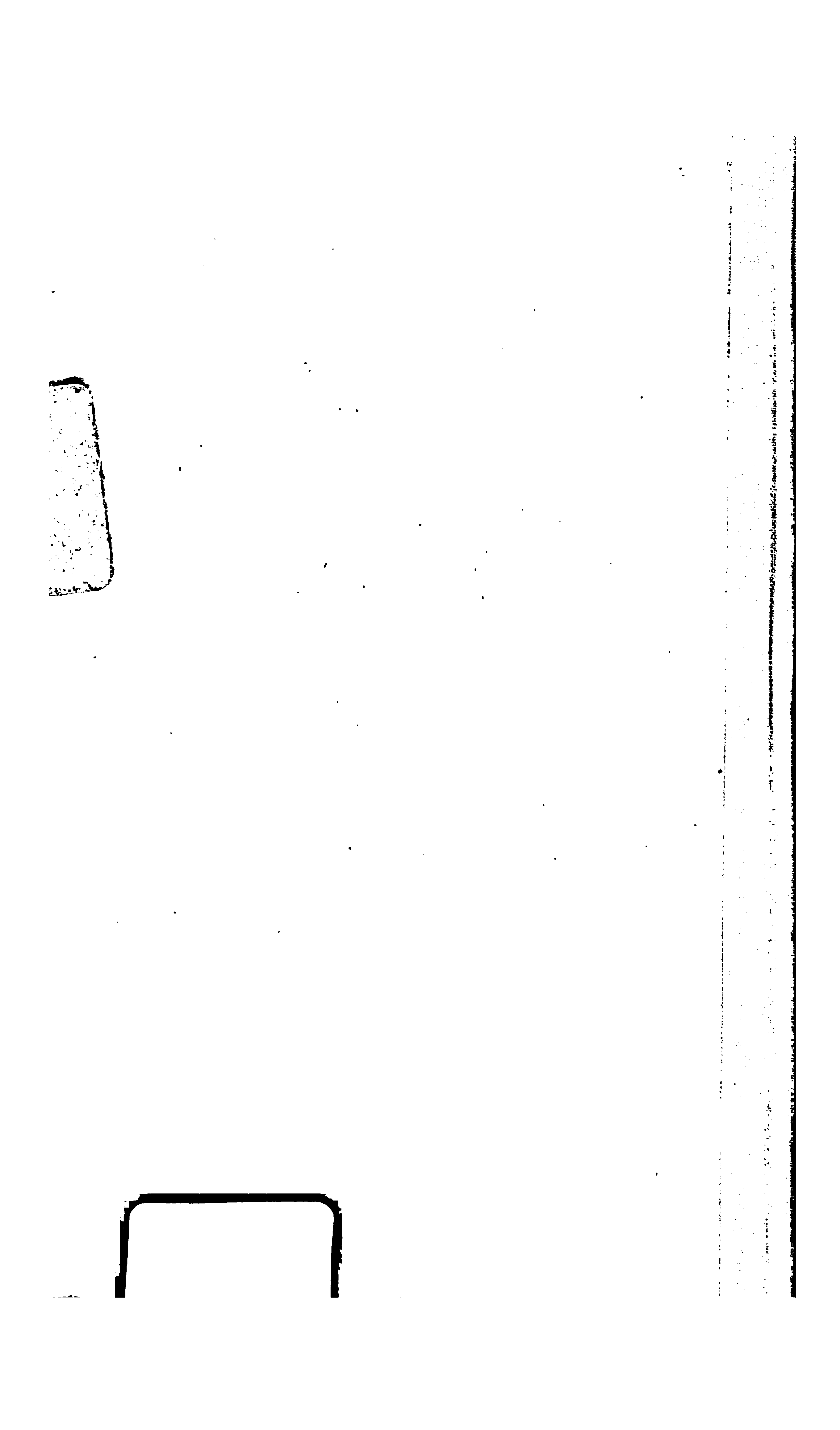
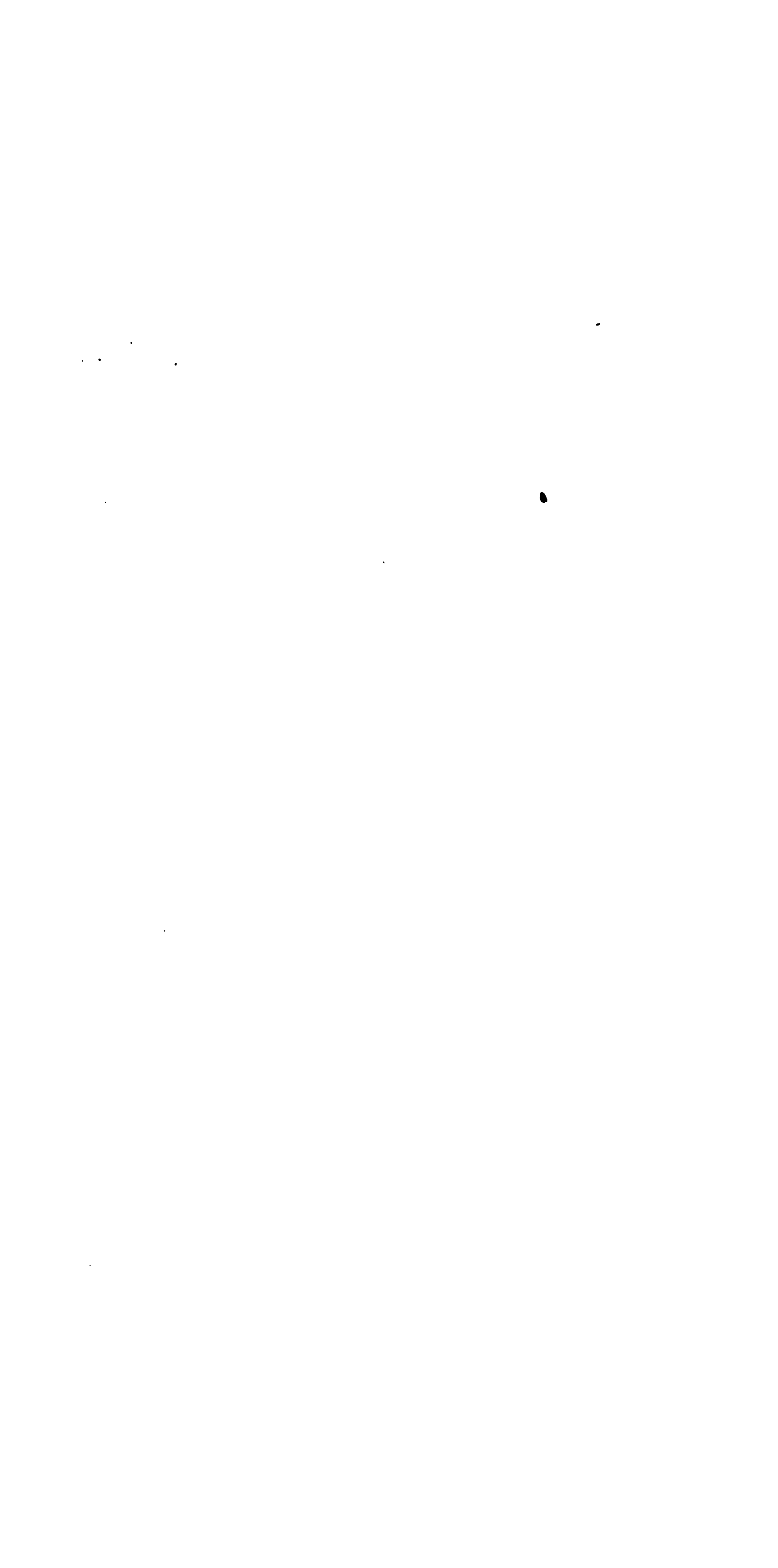


LIBRARIES
910031 5





Lehrbuch der Physik.

Einschließlich der

Physik des Himmels (Himmelskunde), der Luft (Meteorologie) und der Erde (Physikalische Geographie).

Gemäß der neueren Anschauung und mit den neuesten Fortschritten.

Für

Gymnasien, Realschulen und andere höhere Lehranstalten

bearbeitet von

Professor Dr. Paul Reis,

Gymnasiallehrer in Mainz.

> Die allgemeinen Principien der Mechanik bilden die einzig wahre und dauernde Grundlage nicht nur für die Technik, sondern auch für das ganze weite Gebiet der erklärenden Naturwissenschaften.
>
> Redtenbacher's Wahlspruch 1840.



Sechste vermehrte und theilweise umgearbeitete Auflage.

Mit 410 in den Text gedruckten Holzschnitten und 849 Aufgaben nebst Lösungen.

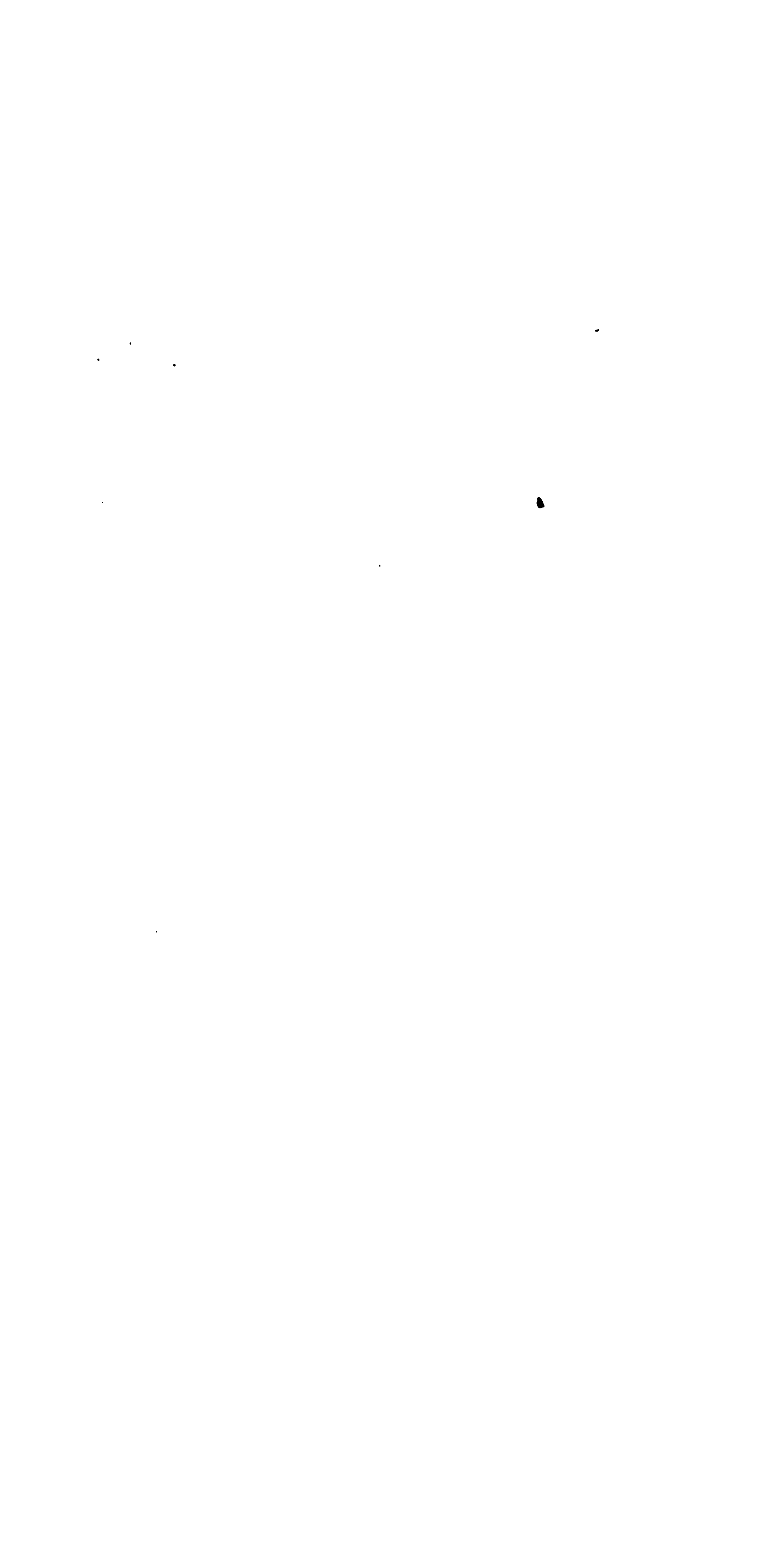
Leipzig

Verlagsbuchhandlung von Quandt & Händel.

1885.







Lehrbuch der Physik.

Einschließlich der

Physik des Himmels (Himmelskunde), der Luft (Meteorologie) und der Erde (Physikalische Geographie).

Gemäß der neueren Anschauung und mit den neuesten Fortschritten.

Für

Gymnasien, Realschulen und andere höhere Lehranstalten

bearbeitet von

Professor Dr. Paul Reis,
Gymnasiallehrer in Mainz.

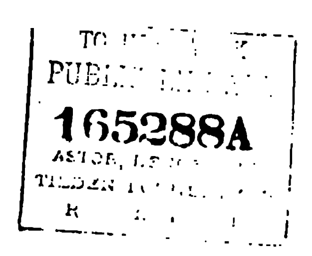
> Die allgemeinen Principien der Mechanik bilden die einzig wahre und dauernde Grundlage nicht nur für die Technik, sondern auch für das ganze weite Gebiet der erklärenden Naturwissenschaften.
> Redtenbacher's Wahlspruch 1840.



Sechste vermehrte und theilweise umgearbeitete Auflage.

Mit 410 in den Text gedruckten Holzschnitten und 849 Aufgaben nebst Lösungen.

Leipzig
Verlagsbuchhandlung von Quandt & Händel.
1885.



Vorwort zur ersten Auflage.

In diesem Buche wird zum erstenmale der Versuch einer Darstellung der modernen Physik für höhere Schulen gemacht; dasselbe hat selbst in den größeren Lehrbüchern keinen Vorgänger. Es wird dies hier ausdrücklich hervorgehoben, um in den großen, mit einer solchen Darstellung verbundenen Schwierigkeiten eine Entschuldigung zu gewinnen für die lange Verzögerung von nahezu drei Jahren, die zwischen der ersten Lieferung und dem Schlußhefte verflossen sind, sowie für manches selbst dem eigenen Streben nicht Genügende, was bei einer neuen Behandlungsweise nicht zu vermeiden ist. Dieselbe besteht darin, daß die physikalischen Erscheinungen und Gesetze aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft und den Anschauungen von Clausius über die innere Bildung des Stoffes auf dem Wege der Deduction abgeleitet und durch das Experiment bestätigt werden, mit Ausnahme der Erscheinungen des Magnetismus und der Elektricität, welche noch der Induction angehören. Aus dem erwähnten Princip wird zuerst der Grundsatz der virtuellen Geschwindigkeiten abgeleitet und aus diesem dann alle Gleichgewichtsgesetze; auch die Grunderscheinung der flüssigen Körper, die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes, und damit die ganze Lehre von den flüssigen und luftförmigen Körpern werden auf jenes Princip und jene Grundanschauungen zurückgeführt; und da die Wellenlehre eine Anwendung der Mechanik ist, so stehen auch die Lehre vom Schalle, vom Lichte und von der strahlenden Wärme auf dem Boden des Grundgesetzes. Eine directe Anwendung dagegen findet dasselbe in der Körperwärme, indem das Gesetz der Aequivalenz von Wärme und Arbeit, die Thatsache der Erzeugung einer unbegrenzten Wärmemenge aus einer begrenzten Stoffmenge durch Bewegung aus demselben hervorgehen, und, da jenes Gesetz und diese Thatsache durch zahlreiche Versuche über allen Zweifel erhoben sind, die mechanische Wärmetheorie, d. i. die Auffassung der Körperwärme als Molekularbewegung gebieterisch verlangen. Deßhalb ist in diesem Lehrbuche derselbe Gang, der schon seit fast einem Jahrhundert für das Licht befolgt wird, die Ableitung der Erscheinungen aus der Bewegungstheorie, auch für die Wärme und zwar ebenfalls zum erstenmale in einem Lehrbuche eingeschlagen worden. Ich durfte dies um so eher versuchen, als mich Niemand einer Vorliebe für die Bewegungstheorie zeihen kann, indem ich vor noch nicht zehn Jahren den letzten Versuch einer Rettung der alten Stofftheorie, die Durchführung der Hypothese, Wärme sei Aether, gewagt hatte, aber in der Folge mich beugen mußte vor dem Gewichte der erwähnten Consequenzen, insbesondere aber vor der glänzenden experimentellen Bestätigung der von der mechanischen Wärmetheorie gemachten Voraussagungen der Erniedrigung des Eisschmelzpunktes durch Druck, der Constanz der Wärmecapacität der Gase, der geringeren specifischen Wärme des Wasserdampfes, der theoretischen Berechnung der latenten Wärme des

Wasserdampfes, Thatsachen, durch welche die Bewegungstheorie der Wärme dieselbe Festigkeit erhielt, wie die Schwingungstheorie des Lichtes durch die circulare Polarisation und die experimentelle Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser.

Wenn nun hiernach kein Zweifel mehr besteht an der Möglichkeit der consequenten Durchführung der Deduction, so könnte doch noch die Frage gestellt werden, ob diese Methode überhaupt lehrhaft und ob sie insbesondere für höhere Schulen lehrfähig sei. Ohne den hohen Werth der Induction für die Forschung nur entfernt in Frage stellen zu wollen, obwohl auch hier an Bessels Wort über seine Beobachtungen des Kometen von 1837 erinnert werden könnte, muß doch gerade die Anwendung der inductiven Methode auf die Geschichte der physikalischen Lehrthätigkeit sofort den Vorzug der Deduction anerkennen; denn wohl in keinem Lehrbuche, in keiner Schule, abgesehen von dem Hörsale eines in seiner Methode allmälig verknöcherten Universitätsprofessors, wird die Mechanik der festen Körper d. i. die allgemeine Mechanik anders als deductiv vorgetragen, und das Experiment anders als zur Bestätigung benutzt; und wer möchte leugnen, daß dieser Theil der Physik am meisten den Charakter der Wissenschaftlichkeit habe. Wenn nun für die übrigen Theile der Physik die Deduction ebenfalls möglich ist, warum sollten diese dann des wissenschaftlichen Charakters entbehren, warum insbesondere des inneren Zusammenhanges, der vorwiegend das Interesse der dem Idealen zugewendeten Jugend erweckt, der den Ueberblick erleichtert und dadurch die Kenntnisse befestigt und hierdurch eine immer weitere und raschere Erkenntniß ermöglicht. Noch weniger aber als die Lehrhaftigkeit scheint mir die Lehrfähigkeit der Deduction in Frage zu stehen; Schüler, die Sophokles und Tacitus verstehen sollen, die Logik und Propädeutik pflegen, denen man die Trigonometrie des schiefwinkeligen Dreiecks zumuthet, die nach ein bis zwei Jahren in alle Tiefen der Wissenschaft eindringen sollen, können auch die Deduction des Brechungsgesetzes und der Gesetze der specifischen Wärme verstehen; man traue es ihnen nur zu, und der Erfolg wird nicht ausbleiben. Ich unterrichte hier seit einer Reihe von Jahren nach dieser Methode, nicht blos an den oberen Gymnasialklassen, sondern auch an den Oberklassen des Scharvogel'schen Institutes, das ungefähr auf der Stufe der preußischen Realschulen zweiter Ordnung steht, und ich habe keine Ursache zur Unzufriedenheit. Allerdings soll den Schülern auch die inductive Methode bekannt werden; dazu bietet aber der Magnetismus und die Elektricität Gelegenheit genug, da diese Lehren sich der Deduction zum größten Theile noch ganz entziehen.

Eine letzte und wesentliche Frage ist die, ob der ganze Inhalt des Buches mit der wünschenswerthen Gründlichkeit in der jetzt zur Verfügung stehenden Zeit vorgenommen werden könne; dies muß allerdings für die neuere preußische Einrichtung, welche die Physik für die ganze Secunda auf eine wöchentliche Stunde herabgedrückt hat, verneint werden; doch wird es auch für diesen hoffentlich bald dem Bedürfnisse weichenden Nothstand dem Lehrer leicht werden, die richtige Auswahl zu treffen, weniger wichtige Aufgaben, das meist dafür eingerichtete klein Gedruckte wegzulassen. In vielen süddeutschen, z. B. hessischen Gymnasien sind für alle Klassen wöchentlich 2 Stunden für Naturkunde bestimmt. Bei dieser Einrichtung würde es sich empfehlen, wie es z. B. in den badischen Lyceen der Fall ist, in einer der Mittelklassen z. B. in Quarta einen physikalischen Vorcurs einzuschieben, und in diesem die einfachsten und wichtigsten Grunderscheinungen durchzunehmen, wodurch nebenbei die Abnormität wegfiele, daß die zahlreichen Abiturienten der Untersecunda, die einstigen Freiwilligen, das Gymnasium ohne Kenntniß des Thermometers und Barometers verlassen. Wenn alsdann in Untersecunda die Grundzüge der Chemie folgen, die dort ganz gut verstanden und mit Vorliebe aufgenommen werden, dann kann in den drei letzten Jahren der Inhalt des Buches

ziemlich vollständig bewältigt werden, in Obersecunda die Einleitung, Magnetismus und Elektricität, in Unterprima die Mechanik und die Wellenlehre, in Oberprima Akustik, Optik und Wärmelehre, ein Gang, den wir im Mainzer Gymnasium befolgen.

Für die zahlreichen freundlichen Zuschriften von Collegen und Fachgenossen, die ich nicht alle im Einzelnen beantworten konnte, sage ich hier den herzlichsten Dank und verbinde damit die dringende Bitte, mir in dem Buche aufgefundene Druckfehler und Versehen, sowie Wünsche und Aenderungen ohne Rückhalt anzuzeigen, damit sie bei einer neuen Auflage, soweit es der Plan des Ganzen gestattet, berücksichtigt werden können.

Wenn man von einem Kinde, dem man viele Jahre harter Arbeit und schwerer Sorge gewidmet hat, mit Wehmuth scheidet, so mag es dieser wohl gestattet sein, sich ein wenig durch die besten Wünsche und die Bitte um Nachsicht, wo es nicht jedem Anspruche gerecht werden sollte, zu mildern.

Mainz, den 16. Mai 1872. **Dr. Paul Reis.**

Vorwort zur sechsten Auflage.

Auch in dieser Auflage wurden die wesentlichen Fortschritte der Wissenschaft in den letzten Jahren berücksichtigt. Nicht wenige Abschnitte mußten eine völlige Umarbeitung erfahren. Die Diffusion der Flüssigkeiten und die verwandten Theile erfuhren die Aenderung, weil die Diffusionsconstante jetzt auf absolutes Maß gegründet ist. — Der eine Theil der Phosphorescenz erhielt durch die Entdeckung der Wirksamkeit des Ozons eine ungeahnte Aufklärung, der andere Theil durch die neuen Leuchtfarben eine außerordentliche Bereicherung; die Neugestaltung des Ganzen machte eine Vergrößerung des Umfanges unvermeidlich. — Der großartige Thatsachenreichthum der Spectralanalyse erfuhr durch Kayser in dessen Lehrbuch eine übersichtliche Zusammenstellung, wodurch die Umarbeitung des betreffenden Abschnittes erleichtert wurde. — Die übermäßige Ausbreitung der Rübenzuckerfabriken hat die Zahl und Güte der Saccharimeter wesentlich erhöht, wodurch eine mehr eingehende Darstellung der Interferenz des polarisirten Lichtes geboten erschien. — Der merkwürdige Zusammenhang der Ausdehnungscoëfficienten der festen und flüssigen Körper mit dem Atomgewicht, Schmelz- und Siedepunkt u. s. w., der in den letzten Jahren enthüllt wurde, hat den Fleiß der Forscher vielfach auf jene Coëfficienten gelenkt: hierdurch ergaben sich Abweichungen von den Gesetzen der Ausdehnung durch die Wärme, die als Folge von molekularen Umlagerungen erkannt wurden und so die bisher unerklärte Anomalie des Wassers an die Schwelle der Aufhellung bringen, entsprechend der in älteren Auflagen ausgesprochenen Vermuthung. Noch merkwürdiger entwickelte sich die Lehre von der Ausdehnung der Gase durch die wahrhaft entzückende (möge dieser Ausdruck einem auf Elementarmathematik angewiesenen Lehrer gestattet sein) van der Waals'sche Zustandsgleichung, welche nicht blos die Abweichungen von den Mariotte'schen und Gaylussac'schen Gesetzen erklärt und den kritischen Zustand auf mathematische Grundlagen stellt, sondern auch eine Anzahl neuer Gesetze entwickelt und so zu sagen eine Pforte zu öffnen scheint, hinter welcher ein neues Licht der Erkenntniß für Wissenschaft und Anwendung seiner Befreiung entgegenharrt. Wenn hiernach die mechanische Wärmetheorie eine ungewöhnliche Bereicherung gewann, so ging auch die Wärmepraxis nicht leer aus, da die rasche Ausbreitung von Ottos neuem Motor eine Besprechung desselben nothwendig machte. — Das

Ideal der Elektricitätslehre, den ganzen Inhalt derselben auf dem Grunde der Potentialtheorie elementar zu erbauen, ist noch nicht erreichbar, weil der Laplace-Poisson'sche Lehrsatz nicht elementar zu beweisen ist. Ich veränderte daher an der inductiven Ableitung nichts, gab nur eine Darstellung, historische Entwickelung und womöglich Beweis der Grundlagen und suchte die Hauptsätze der Elektricität daraus abzuleiten; am Schlusse jedes Abschnittes wurden die Auffassung und Resultate der Potentialtheorie zugefügt. Diesem Standpunkt und dem letzten Congreß der Elektriker entsprechend wurde auch das absolute Maß umgearbeitet und durch Aufnahme der neuen Meßinstrumente vervollständigt. In der Lehre von den magnet- und dynamo-elektrischen Maschinen wurde durch die verschiedenen Eintheilungssysteme die Uebersicht erleichtert, und dem neuesten und vollkommensten Werke, der Compoundmaschine, eingehende Betrachtung gewidmet. — Als der physikalische Theil der Geologie, die Physik der Erde, zuerst ausgearbeitet wurde, waren die Werke von Heim, Sueß u. A. noch nicht erschienen, in denen die Geotektonik, die Vulkane und Erdbeben auf die Abkühlung der Pyrosphäre zurückgeführt sind; die betreffenden Abschnitte mußten daher eine völlig neue Bearbeitung erfahren. — Die Wanderungen der Minima sind auf der deutschen Seewarte, besonders durch Köppen und van Bebber fortdauernden Studien unterzogen worden; demgemäß mußte auch dieser Abschnitt einer erweiterten Umgestaltung theilhaftig werden.

Mainz, den 25. Juni 1885. Prof. **Dr. Reis.**

Uebersicht des Inhaltes.

Einleitung.

Erster Theil der Physik.

Die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik.

Erste Abtheilung.

Zweite Abtheilung.

Dritte Abtheilung.

Zweiter Theil der Physik.

Die Lehre von der Molekularbewegung oder die engere Physik.

Lehrbuch der Physik.

Die Natur und die Naturwissenschaft.

1 Unter Natur verstehen wir den Inbegriff aller sinnlich wahrnehmbaren Dinge. Die einzelnen Dinge werden Naturkörper oder Naturgegenstände genannt.

Der „Naturkörper" steht im Gegensatze zu dem durch menschliche Handfertigkeit erzeugten Kunstkörper, an dem indeß nur die Form Gegenstand der Kunst ist, während der Stoff Naturgegenstand bleibt. — Die beiden Ausdrücke „Naturkörper" und „Naturgegenstände" haben nicht genau denselben Umfang; denn ein Naturkörper ist nur dasjenige Ding, das sofort mit einem oder mehreren der fünf Sinne erfaßt wird, während zu den Naturgegenständen auch solche Dinge gezählt werden, wie Raum, Zeit, Kraft u. s. w., die wir zwar nicht unmittelbar mit den Sinnen wahrnehmen, welche uns aber doch durch die sinnliche Erfahrung zum Bewußtsein kommen. Indessen zieht die Naturwissenschaft nur dasjenige von diesen Naturgegenständen in den Kreis ihrer Betrachtung, was sinnlich erfahrungsmäßig ist. Die Wesenheiten dieser und aller Dinge dagegen werden von der Metaphysik zu ergründen gesucht.

2 Die Naturwissenschaft oder Naturkunde befaßt sich mit den Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände, sowie mit den Gesetzen und Ursachen dieser Eigenschaften und Veränderungen. Die Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände werden Erscheinungen oder Phänomene genannt.

Wenn ein Körper passend unterstützt ist, so ruht er; das ist eine Eigenschaft des Körpers. Entziehen wir ihm die Unterstützung, so fällt er; das ist eine Veränderung des Körpers; beides sind Erscheinungen. Wenn wir ausfindig gemacht haben, daß der Körper in der ersten Secunde des freien Fallens 5 Meter zurücklegt, so haben wir ein Gesetz der zweiten Erscheinung gefunden. Wenn endlich erkannt worden ist, daß die Erde eine anziehende Kraft ausübt, und daß demnach alle nicht unterstützten Körper sich der Erde nähern müssen, so ist auch die nächste Ursache der zweiten Erscheinung angegeben. Wenn wir nun hieraus schließen, daß ein unterstützter Körper deßhalb nicht fallen kann, weil die Festigkeit der Stütze größer ist als die Anziehung der Erde auf den Körper, so haben wir auch die Ursache der ersten Erscheinung, der Eigenschaft der Ruhe, erkannt.

Die Naturkunde zerfällt in die Naturlehre und in die Naturgeschichte. Die Naturlehre ist die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände im Allgemeinen; die Naturgeschichte ist die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände im Besonderen.

Ein nicht unterstützter Körper fällt. Diese Erscheinung zeigen im luftleeren Raume alle Körper; demnach gehört die Betrachtung derselben in die Naturlehre. Ein der Unterstützung beraubter Vogel kann sich in der Luft durch die Kraft seiner Flügel gegen das Fallen schützen. Dies ist eine Erscheinung, die einer besonderen Abtheilung von Naturgegenständen angehört; demnach fällt sie der Naturgeschichte anheim.

3 Wenn die Naturgeschichte die Körper im Besonderen betrachtet, so muß sie auch sofort Unterschiede und Uebereinstimmungen derselben wahrnehmen und muß daher die Körper eintheilen. Sie theilt alle Naturkörper zunächst in organische und unorganische Naturkörper. Organische Körper sind solche, welche Werkzeuge oder Organe für Veränderungen an sich selbst besitzen; unorganische Körper sind dagegen solche, welche keine Werkzeuge zu eigener Veränderung haben.

Die Thiere haben Glieder für ihre eigene Bewegung, sie haben Sinne für die Wahrnehmung und Empfindung; die Pflanzen sind mit Organen für das Wachsthum und für die Bildung der Frucht versehen. Wird dagegen an einem Steine nicht durch einen äußeren Einfluß etwas verändert, so bleibt er immer derselbe.

Die selbständigen Veränderungen der organischen Körper werden Lebensthätigkeiten genannt; es gibt deren 4: Ernährung, Fortpflanzung, Bewegung und Empfindung. Hiernach theilt man die organischen Wesen ein in solche, die nur 2 Lebensthätigkeiten, Ernährung und Fortpflanzung, besitzen: Pflanzen; sodann in solche, welche alle 4 Lebensthätigkeiten ausüben: Thiere. Die Gesammtheit der Pflanzen bildet das Pflanzenreich, die Gesammtheit der Thiere das Thierreich, und die Gesammtheit aller unorganischen Körper das Mineralreich.

Gemäß dieser Eintheilung der Natur kann auch die Naturgeschichte zerlegt werden: die Lehre von den Eigenschaften und Veränderungen der Thiere heißt Zoologie, die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Pflanzen nennt man Botanik. Hilfswissenschaften sind: die Anatomie oder die Lehre von der Beschaffenheit der Organe, und die Physiologie oder die Lehre von den Verrichtungen der Organe.

Die Naturgeschichte des Mineralreiches zerfällt in mehrere Wissenschaften. Man kann nämlich jedes der drei Naturreiche in drei Kreise theilen: das Thierreich in Wirbelthiere, Gliederthiere und Bauchthiere, das Pflanzenreich in Dicotyledonen, Monocotyledonen und Acotyledonen, und das Mineralreich in Versteinerungen, Felsarten und Mineralien. Die Wissenschaft von den Mineralien, d. i. den gleichartigen unorganischen Naturkörpern, heißt Mineralogie; die Lehre von den Felsarten, welche die Erdschichten und Gebirgsmassen bilden und meist aus mehreren Mineralien gemengt sind, heißt Geognosie. Die Versteinerungen sind solche Pflanzen- oder Thierkörper, in denen der organische Stoff allmälig durch Stein ersetzt worden ist, während die Körperform erhalten blieb; die Wissenschaft von den Versteinerungen wird Petrefactologie genannt. — Alle drei Kreise des Mineralreiches können nur durch äußere Einflüsse verändert, umgebildet werden und haben durch solche Umbildungen ihren jetzigen Zustand erhalten. Die Wissenschaft von der Entstehung und Umbildung der Mineralien, der Erdschichten und Gebirgsmassen, ja der ganzen Erdmasse ist die Geologie. Im weiteren Aufschreiten vom Kleineren zum Größeren könnten wir an dieselbe schließen die physische Astronomie, d. i. die Beschreibung der unorganischen Körper außerhalb der Erde, der sogenannten Weltkörper. Doch wird dieselbe gewöhnlich mit den übrigen astronomischen Wissenschaften vereinigt.

4 Die Naturlehre wird in zwei Hauptwissenschaften getheilt: die Chemie und die Physik, welche beide wieder in große Kreise von Einzelwissenschaften aus einander gehen. Die Chemie ist die Lehre von den inneren oder Stoff-Aenderungen der Körper; die Physik ist im Gegensatze zu der Chemie die Wissenschaft von den äußeren oder Zustand-Aenderungen der Körper. Von der Physik haben sich zu voller Selbständigkeit abgezweigt: die Physik des Himmels oder die sphärische Astronomie, d. i. die Wissenschaft von den äußeren Veränderungen oder Bewegungen der Himmelskörper; die Physik der Luft oder Meteorologie, d. i. die Wissenschaft von den Veränderungen in der Lufthülle; die Physik der Erde, welche theils mit der Geologie, theils mit der physischen, theils mit der Pflanzen- und Thier-Geographie zusammenfällt.

Die Aufgabe der Physik.

5 **Physik und Chemie.** Die Aufgabe der Physik ist die Erforschung der Zustandänderungen. Dieselben sind nicht mit einer Aenderung des Stoffes verbunden; die Erforschung der Stoffänderungen ist die Aufgabe der Chemie.

Wenn der Schwefel bei einer gewissen Hitze schmilzt, so hat er nur eine Zustandänderung erfahren; denn er ist blos aus dem festen Zustande in den flüssigen Zustand übergegangen; der flüssige Schwefel enthält aber durchaus denselben Stoff wie der feste. Wenn dagegen der Schwefel bei einer gewissen Hitze und Luftzutritt verbrennt, so ist dies

eine Stoffänderung; denn das Product der Verbrennung enthält nicht allein Schwefel, sondern auch Sauerstoff. — Wenn wir Wasser auf einen gewissen Grad erhitzen und auf demselben erhalten, so verwandelt es sich in Dampf. Darin liegt eine blose Zustandänderung, eine Verwandlung flüssigen Wassers in luftförmiges Wasser; denn der Wasserdampf hat dieselben Bestandtheile, dieselben Verwandtschaften, dieselben chemischen Einwirkungen wie das Wasser. Wird dagegen Phosphor längere Zeit auf einer gewissen Temperatur erhalten, so entsteht der rothe oder amorphe Phosphor, der zwar durchaus denselben Stoff enthält, wie der gewöhnliche Phosphor, aber andere Verwandtschaften, andere chemische Wirkungen hat als dieser, und daher als eine chemische oder Stoffänderung desselben angesehen wird. — Wird Platin einer, wenn auch sehr großen, Hitze ausgesetzt, so wird es nur heißer, es erleidet nur eine Zustandänderung, es ist, wie man sagt, aus einem niederen Temperatur-Zustande in einen höheren übergegangen. Erhitzt man dagegen Quecksilber an der Luft Monate lang ununterbrochen zum Kochen, so verwandelt es sich in Quecksilberoxyd; dieser Vorgang ist eine Stoffänderung, denn das Quecksilberoxyd besteht nicht aus reinem Quecksilber, sondern aus Quecksilber und Sauerstoff. — Erfährt ein ruhender, freier Körper einen Stoß, so bewegt er sich, er geht aus dem Zustande der Ruhe in den Zustand der Bewegung über; dies ist eine blose Zustandänderung. Erfährt dagegen Knallquecksilber einen starken Stoß, so erleidet es eine Stoffänderung, es zersetzt sich, und der zurückbleibende Stoff ist von dem ursprünglichen durchaus verschieden. — Ein weißer Körper ist in einem lichtlosen Raume absolut schwarz, in einem mit ausschließlich rothem Lichte erleuchteten Raume roth, dagegen wenn Sonnenlicht auf ihn fällt, weiß. Dies sind blose Aenderungen des Lichtzustandes. Fällt dagegen Sonnenlicht auf weißes, mit Jodsilber durchdrungenes Papier, so wird dieser Stoff in seine Bestandtheile zersetzt, von denen der eine leicht entfernt werden kann. Durch das Licht ist hier eine Stoffänderung bewirkt worden. — Geht ein elektrischer Strom durch einen Draht, so wird derselbe glühend, er erleidet nur eine Aenderung seines Licht- und Wärmezustandes. Geht dagegen der elektrische Strom durch Wasser, so wird dasselbe in seine Bestandtheile zerlegt, es erleidet eine Stoffänderung. — Wenn man Glas mit einem Kautschuklappen reibt, so sprüht es stechende Funken; es ist aber durchaus Glas geblieben, es hat nur seinen elektrischen Zustand geändert, also nur eine Zustandänderung erfahren. Wenn man dagegen Phosphor reibt, so entzündet er sich und wird in feuchter Luft zu Phosphorsäure, einer sauren Flüssigkeit, die sich in jeder Beziehung vom Phosphor unterscheidet; es hat eine Stoffänderung stattgefunden, da die Phosphorsäure außer Phosphor noch Sauerstoff und Wasserstoff enthält. — Aus diesen Beispielen erhellt nebenbei, daß ein und derselbe Körper durch die eine Einwirkung nur eine Zustandänderung, durch eine andere eine Stoffänderung erfährt, während umgekehrt durch eine und dieselbe Einwirkung bei dem einen Körper nur eine Zustandänderung, bei dem anderen eine Stoffänderung erzielt wird. Daraus ergibt sich der enge Zusammenhang von Physik und Chemie.

Naturgesetz. Grundgesetz. Axiom. Die Physik hat bei der Erforschung der Zustandänderungen zunächst anzugeben, unter welchen Umständen eine solche Aenderung eintritt. 6

Beispiele: der Phosphor schmilzt bei einer etwas höheren Wärme, als sie das Blut der Vögel besitzt. Wenn ein Körper erwärmt wird, so vergrößert er meist seinen Rauminhalt, er dehnt sich aus. — Hinlänglich bewegliche Körper, welche dieselbe Art von Elektricität enthalten, entfernen sich von einander, sie stoßen einander ab. — Wird Wasser unter gewöhnlichen Umständen zu unserer gewöhnlichen Winterkälte abgekühlt, so wird es fest. Wenn wir hingegen Wasser von jedem Luftzuge, von jeder, auch der leisesten Erschütterung absperren, oder wenn wir auf dasselbe einen sehr starken Druck ausüben, oder wenn wir es in die heftigste Bewegung durch einander rütteln, oder wenn wir Salz in demselben auflösen, so gefriert es nicht bei der gewöhnlichen, sondern erst bei der stärksten Winterkälte.

Sind in solcher Weise die Umstände oder Bedingungen einer Erscheinung scharf angegeben, so erhält hierdurch der blose Ausspruch der Erscheinung schon etwas Gesetzmäßiges und kann daher wohl ein *Naturgesetz* genannt werden, wie dies auch häufig geschieht; denn aller Erfahrung gemäß tritt immer wieder dieselbe Erscheinung ein, wenn wieder dieselben Umstände stattfinden. Indessen versteht man doch in der Wissenschaft gewöhnlich unter Naturgesetz nicht den, wenn auch noch so kurzen und scharfen Ausspruch einer Erscheinung, sondern *ein Naturgesetz ist die Angabe, wie die bei einer Erscheinung auftretenden Größen von einander abhängen.*

Fallen Lichtstrahlen auf eine glatte Fläche, so werden dieselben großentheils zurückgeworfen. Dies ist der kurze Ausspruch einer Erscheinung. Ein **Gesetz** dieser Erscheinung sprechen wir aus, wenn wir angeben, daß der Winkel, den die zurückgeworfenen Strahlen mit der Fläche machen, genau dem Winkel gleich ist, den die einfallenden Strahlen mit der Fläche einschließen, wie groß der letztere auch sein möge. — Gesetze, welche sich auf solche Grundeigenschaften der Körper beziehen, die auf alle oder wenigstens auf viele Erscheinungen Einfluß haben, werden **Grundgesetze** genannt. Eine Grundeigenschaft aller Körper ist die gegenseitige Anziehung derselben. Daß diese gegenseitige Anziehung der Körper um so größer wird, je mehr Masse die Körper haben, ist ein physikalisches Grundgesetz. — Grundgesetze sind nicht zu verwechseln mit den allgemeinen Sätzen oder **Axiomen**, die in der Physik, wie in der Mathematik, von großer Wichtigkeit sind, und Wahrheiten angeben, die nicht mehr aus anderen abgeleitet werden können, aber sofort als richtig einleuchten, oder durch tausendjährige Erfahrung als richtig bekannt sind. Ein solches Axiom ist z. B. der Satz: Kein Körper kann von selbst seinen Zustand ändern, ein Axiom, das man auch die Eigenschaft der Trägheit oder das Gesetz der Trägheit nennt.

7 **Ursache. Wesen. Hypothese.** Die Aufgabe der Physik finden wir jetzt dahin erweitert, daß neben der Erscheinung und ihren Bedingungen auch die gesetzmäßigen Größenverhältnisse derselben erforscht werden müssen. Wenn nun auch die Erkenntniß dieser Gesetzmäßigkeit hohe Freude und nebenbei großen Nutzen in der Anwendung der Naturerscheinungen gewährt, so ist doch der Drang nach Enthüllung der Naturgeheimnisse so groß, daß man auch nach den Ursachen der Erscheinungen und der Gesetze derselben geforscht hat, sowie nach der Art, wie die Ursache in einem Körper die Erscheinung hervorruft, also nach dem inneren Vorgange, dem Wesen der Erscheinung. Außerdem trachtet man danach, die vielen Ursachen der verschiedenen Erscheinungen auf eine oder wenige Grundursachen zurückzuführen. — Aus dem Wesen einer Ursache und dem Wesen eines Körpers den inneren Vorgang, also das Wesen einer Erscheinung und ihrer gesetzmäßigen Größenverhältnisse auffinden, heißt **eine Erscheinung erklären.** Häufig reicht schon die Kenntniß einer oder einiger Haupteigenschaften der Ursache und des Körpers zur Erklärung der Erscheinung aus. So werden die Bewegungen der Körper im Ganzen, wie der freie Fall, der Wurf, die Kreisbewegung der Himmelskörper u. s. w., durch die allgemeine Anziehung aller Körper und die Trägheit derselben erklärt. In vielen Fällen ist aber die Wirkung einer Ursache so sehr mit dem inneren Wesen derselben verschmolzen, daß man nur dann eine befriedigende Erklärung geben kann, wenn man das Wesen der Ursache und das Wesen des Körpers kennt, auf den die Ursache wirkt. Da indessen das Wesen der Dinge der directen sinnlichen Erfahrung nicht zugänglich ist, so muß man über das Wesen der Ursachen und der Körper Vermuthungen oder Hypothesen aufstellen, um mittels derselben die Erscheinungen erklären zu können, und um in die bunte Mannigfaltigkeit derselben einen inneren Zusammenhang zu bringen, der nicht nur das Erlernen, sondern auch das Erforschen erleichtert. In manchen Fällen ist sogar die Ursache einer Erscheinung nicht mehr wahrzunehmen und muß dann ebenfalls vermuthungsweise angenommen werden. **Hypothesen sind also Vermuthungen über die Ursachen der Erscheinungen.** Eine Hypothese gewinnt um so mehr an Wahrscheinlichkeit, je leichter und einfacher sich alle betreffenden Erscheinungen mittels derselben erklären lassen; sie kommt der Gewißheit nahe, wenn sich aus ihr neue, vorher unbekannte Erscheinungen ableiten lassen, und wenn dieselben dann bei der Anstellung des Versuches sowohl der Art, als besonders der Größe nach so eintreffen, wie sie aus der Hypothese abgeleitet wurden. Die Hypothese fällt und verliert jeden Werth, wenn irgend eine neu entdeckte Erscheinung sich durch sie nicht erklären läßt oder ihr gar widerspricht.

Newton stellte zur Erklärung der Lichterscheinungen die Hypothese auf, das Licht sei ein höchst feiner, unwägbarer, allen leuchtenden Körpern entströmender Stoff. Huyghens dagegen suchte fast zur selben Zeit die Anschauung durchzuführen, daß das Licht eine

unendlich feine zitternde Bewegung eines Alles durchdringenden ätherischen Stoffes sei. Der große Name Newtons und die Einfachheit seiner Hypothese verhalfen derselben für länger als ein Jahrhundert zum Siege, bis endlich die Entdeckung der Interferenzerscheinungen ihren Sturz herbeiführte. Diese Erscheinungen bestehen nämlich darin, daß Licht zu Licht gebracht wird, und daß hierbei Dunkelheit erzeugt werden kann. Dies wäre ganz undenkbar, wenn das Licht ein Stoff wäre, läßt sich aber leicht erklären, wenn dasselbe eine Bewegung ist, weil Bewegungen einander aufheben können. Die Anschauung von Huyghens erhielt hierdurch ein bedeutendes Uebergewicht. Kein Physiker zweifelt jetzt mehr an der Wahrheit derselben; denn es wurden aus ihr auf mathematischem Wege Erscheinungen gefolgert, die, vorher ganz unbekannt, bei entsprechend angestellten Beobachtungen sich als vollkommen vorhanden ergaben. — Auch für die Wärme bestand bis in unsere Zeit die Meinung, daß sie ein außerordentlich feiner, Alles durchdringender Stoff sei. Nun hat man aber auch für die Wärme Interferenzerscheinungen nachgewiesen. Außerdem wurde gezeigt, daß man aus einem Körper durch Schlagen, Stoßen, Reiben u. s. w. eine unbegrenzte Wärmemenge entwickeln könne, ohne an dem Körper den geringsten Gewichtsverlust wahrzunehmen. Es ist aber schon undenkbar, daß ein begrenzter Körper eine unbegrenzte Stoffmenge verlieren könne; noch weniger scheint dies ohne Gewichtsverlust möglich. Deßhalb ist die ältere Anschauung über das Wesen der Wärme verlassen worden, und die Hypothese, die Wärme sei eine außerordentlich feine Bewegung der Körpertheilchen, hat die Oberhand gewonnen. Da man aus dieser Theorie unbekannte Erscheinungen sowohl der Art wie der Größe nach abgeleitet hat, wie z. B. die Erniedrigung des Schmelzpunktes des Eises durch Druck, so zweifelt man nicht mehr an der Wahrheit derselben. — Für den Schall zeigt uns der erste Blick auf eine tönende Saite, daß derselbe in einer schwingenden Bewegung der schallenden Körper zu suchen ist, und manche Analogien geben der Vermuthung Raum, daß auch die Elektricität und der Magnetismus ihren Grund in eigens gearteten Bewegungen haben. Die meisten anderen Naturerscheinungen sind nichts, als Bewegungen ganzer Körper oder ihrer Theile, und wo uns eine Erscheinung vollkommen den Charakter der Ruhe zu haben scheint, da sieht das mathematisch geschärfte Auge des Physikers doch den Grund in irgend einer Bewegung. — So erscheinen der modernen Physik alle Zustandänderungen als Bewegungen ganzer Körper, oder ihrer Theile, oder als Bewegungen der kleinsten Theilchen.

Die Aufgabe der Physik kann sonach jetzt vollständig gefaßt werden: die Physik ist die Wissenschaft von den Bewegungen, welche Zustandänderungen der Körper erzeugen, von den Gesetzen, nach welchen diese Erscheinungen erfolgen, und von den Ursachen, welche die Erscheinungen und die Gesetze derselben bedingen.

Das Verfahren der Physik.

Beobachtung. Apparate. Wie in der Aufgabe der Physik, so lassen sich auch in dem Verfahren derselben drei Stufen unterscheiden. Die erste Stufe ist die Beobachtung der Erscheinung. Genau und rein muß die Zustandänderung, welche die Erscheinung bildet, erfaßt und ausgedrückt werden, alle Körper, welche mit dem sich verändernden Körper in Verbindung oder Beziehung stehen, alle Einflüsse, die auf denselben wirken können, müssen auf das Genaueste und in allen ihren Verhältnissen, der Art und Größe nach, erkannt werden. Zur Schärfung der Beobachtung dienen häufig Instrumente. 8

Die menschlichen Sinneswerkzeuge sind nämlich nur zur unmittelbaren Wahrnehmung dessen geschickt, was mit der menschlichen Größe nicht in all zu schroffem Gegensatze steht. Das Uebergroße, wie das Ueberferne kann unser Blick ebenso wenig umfassen, als er das Ueberkleine und das höchst fein Verdünnte zu erkennen vermag. Deßhalb führt uns das Mikroskop in die Welt des Kleinen, das Teleskop und das Fernrohr eröffnen uns ferne Welten, das Spectroskop läßt uns unendlich fernen, leuchtenden Stoff erkennen und macht uns fähig, sonst unsichtbare Luftarten mit dem Blicke zu unterscheiden und selbst die unmerklichsten Spuren des verdünntesten Stoffes wahrzunehmen, Töplers Schlierenapparat macht uns die feinsten Aenderungen der Dichtigkeit durchsichtiger Stoffe, wie z. B. die Schallwellen in der Luft sichtbar, der Resonator hebt aus einem Gemische von Tönen einen einzelnen mächtig heraus, der Augenspiegel und der Kehlkopfspiegel lassen uns in das Innere der Sinnesorgane blicken u. s. w. Allein auch die besten Instrumente gehen nicht über gewisse Grenzen hinaus; die Beobachtung ist hierdurch beschränkt. — Noch mehr Schwierigkeiten stellen sich der zuverlässigen Beobachtung durch die Schwäche und Wandelbarkeit der menschlichen Natur entgegen. Tritt der Beobachter mit vorgefaßten Meinungen über das

Wesen einer Erscheinung an dieselbe heran, so wird die Klarheit seines Blickes gestört sein, die Schärfe der Beobachtung wird leiden. Oft wird dann die Erscheinung *falsch aufgefaßt*, ja sogar Unmögliches oder gar nicht Vorhandenes gesehen werden. So hatten die Beobachter des Mittelalters die vorgefaßte Meinung, daß die Lehren des Alterthums unumstößliche Wahrheit seien: sie suchten daher und fanden folglich auch in der Natur nur Bestätigungen jener Lehren. Trotz des Fleißes der Alchymisten wurde daher die Wissenschaft nur wenig gefördert, aber Goldmacherei, Sterndeuterei, Hexenaberglaube u. s. w. waren die Folgen befangener Beobachtung. Auch in unserer Zeit mußten die Tische tanzen und durch Geisterklopfen Geheimnisse offenbaren, weil man mit der vorgefaßten Meinung zu Werke ging, daß die Berührung der Hände verborgene Kräfte erwecken könne. — Reinheit und Unbefangenheit des Sinnes sind also Vorbedingung, Schärfe und Genauigkeit das Haupterforderniß einer Beobachtung. Zur Erzielung der letzteren Eigenschaften ist ein längeres Studium der Naturgeschichte, besonders der Botanik, zu empfehlen.

Ist eine Erscheinung beobachtet, so muß der Physiker untersuchen, ob dieselbe wirklich den vermutheten Einflüssen zu verdanken war. Dies geschieht dadurch, daß er die Erscheinung in größerem oder kleinerem Maßstabe, befreit von Nebendingen, nachzuahmen sucht. Der Physiker muß also *Versuche machen, Experimente anstellen, experimentiren*; hierzu bedarf er der *physikalischen Apparate*.

Die Experimentirkunst, welche die Körper den verschiedensten Einflüssen unter allen nur denkbaren Verhältnissen aussetzt, erkennt hierdurch nicht blos die Erscheinungen schärfer, sondern erfindet oder entdeckt auch viele neue Erscheinungen, die oft in überraschender Weise früher ganz dunkel gebliebene Phänomene aufklären oder ganz unbekannte Ursachen zu Tage fördern. Sie darf sich aber nicht die Aufgabe stellen, ein praktisches Ziel zu erreichen oder Nutzen zu stiften. Die Natur zu erforschen, muß ihr einziger Zweck sein; der praktische Nutzen ergibt sich nebenbei oder folgt erst viel später. Wer hätte wohl bei den ältesten elektrischen Versuchen schon an die Erkenntniß des Gewitters, an den elektrischen Telegraphen, das Telephon oder daran gedacht, daß die elektrische Kraft die ganze Natur durchdringe? So mag auch Manches jetzt als Spiel erscheinen, was später der ganzen Menschheit Erkenntniß oder Nutzen gewähren kann. Schon allein das Ersinnen physikalischer Apparate, das Anstellen der Experimente hat die Summe des der Menschheit innewohnenden mechanischen Talentes so entwickelt, daß neue Erfindungen jetzt etwas Alltägliches sind.

9 Die zweite und wichtigste Stufe in dem Verfahren der Physik ist die *Ermittelung der Gesetze*. Zu dem Ende müssen alle Größen, die mit der Erscheinung verknüpft sind, genau gemessen, und muß die Art der Abhängigkeit dieser Größen von einander festgestellt werden. Sodann muß man die Erscheinung unter den verschiedensten Umständen hervorrufen und in allen Fällen dieselben Größen messen. Ergibt sich nun, daß die anfänglich gefundene Art der Abhängigkeit unter allen Umständen dieselbe bleibt, so ist mit dem Ausspruche jener Abhängigkeit das Gesetz gefunden.

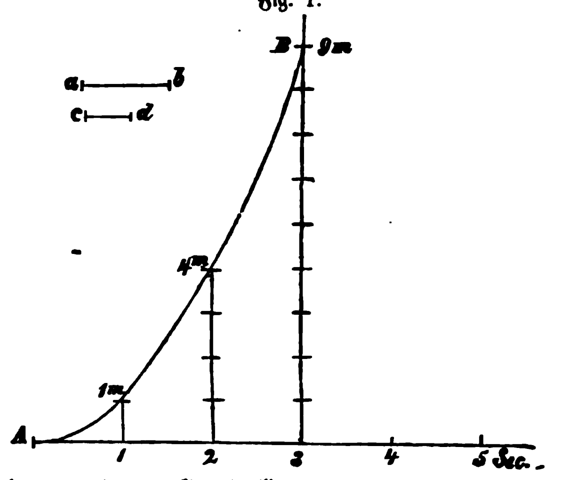
Hat man z. B. Lichtstrahlen unter den verschiedensten Winkeln auf eine glatte Fläche fallen lassen und durch Messung gefunden, daß in allen Fällen der Winkel, unter welchem die Strahlen zurückgeworfen werden, gerade so groß ist als der Winkel, unter welchem die Strahlen eintreffen, so darf man das Gesetz aufstellen: der Winkel der zurückgeworfenen Strahlen ist gleich dem Winkel der einfallenden Strahlen. — Läßt man eine kleine Bleikugel aus verschiedenen Höhen herabfallen, so findet man, daß sie auf dem Boden anlangt nach 1, 2, 3, 4, 5 Secunden aus einer Höhe von 5, 20, 45, 80, 125 Meter, daß also Fallräume von 5, 20, 45, 80, 125 Metern durchlaufen werden in den Fallzeiten von bezüglich 1, 2, 3, 4, 5 Secunden. Scheidet man aus den Fallräumen den Factor 5 aus, so nehmen dieselben die Form an: 1.5, 4.5, 9.5, 16.5, 25.5. Es ist leicht ersichtlich, daß die übrigen Factoren sich verhalten wie die Quadrate von 1, 2, 3, 4, 5, also wie die Quadrate der Fallzeiten. Demnach gilt das Gesetz: die Fallräume verhalten sich zu einander wie die Quadrate der Fallzeiten.

Ist die Abhängigkeit bei jedem folgenden Versuche eine andere, so folgt daraus, daß dieselbe überhaupt keine einfache ist; die eine Größe ist dann, wie die Mathematik sagt, eine verwickelte Function der anderen. Die höhere Mathematik, welche ja eigentlich die Wissenschaft der Functionen ist, gibt häufig Mittel an die Hand, für die gesuchte Abhängigkeit einen mathematischen Ausdruck, eine

Formel zu finden, welche sich alsdann oft auch in einfachen Sätzen wörtlich aussprechen läßt. Ein solches Mittel ist z. B. die räumliche oder graphische Darstellung der gefundenen Größen und die sodann erfolgende Untersuchung der gewonnenen Form nach den Regeln der analytischen Geometrie.

Denkt man sich zum Beispiel 1 Secunde durch eine gewisse Strecke ab (Fig. 1) und 1 Meter durch eine andere Strecke cd dargestellt, trägt man sodann die Secunden auf eine wagrechte Achse, die zugehörigen Fallräume aber auf senkrechte von den Endpunkten der Secundenstrecken ausgehende Gerade, und verbindet man endlich die Endpunkte dieser Senkrechten, so erhält man die Curve AB, eine Darstellung der Abhängigkeit der Fallräume von den Fallzeiten. Ergibt sich nun bei näherer Untersuchung, daß diese Curve eine Parabel ist, so gelten die Gesetze dieser Linie auch für die Fallräume, woraus man das schon angeführte Fallgesetz abermals finden kann.

Fig. 1.



Indessen gibt es auch Fälle, wo selbst die höhere Mathematik noch nicht im Stande war, die Abhängigkeit zahlreicher Versuchsresultate von den zu Grunde liegenden Umständen zu finden. So hat man z. B. noch nicht ermittelt, in welchem gesetzmäßigen Zusammenhange die Spannung des Wasserdampfes mit der Temperatur desselben steht, trotzdem zahllose Versuche angestellt und alle Mittel der Mathematik auf die Resultate derselben angewandt wurden.

In manchen Fällen zeigen verschiedene Erscheinungen eine gewisse Uebereinstimmung und ihre Gesetze deuten auf einen inneren Zusammenhang. Diese Gesetze sind dann gewöhnlich nur Ausflüsse eines höheren Grundgesetzes, für dessen Auffindung kein bestimmtes Verfahren angegeben werden kann. Solche Grundgesetze werden auch nur von den tiefsten Geistern aufgefunden, deren Namen durch die Gesetze verewigt werden. Solche Grundgesetze sind Ausdrücke für die Grundeigenschaften aller Körper und sind eines der höchsten Ziele der Physik; denn sie ermöglichen die dritte Stufe des physikalischen Verfahrens, die Erklärung der Naturerscheinungen.

Der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen dem Fallen der Körper auf der Erde und der Bewegung des Mondes um die Erde; das Gesetz von der elliptischen Bahn der Planeten, Kometen, der Doppelsterne, wahrscheinlich auch aller Fixsterne; das Gesetz, wonach ein Weltkörper sich um so rascher bewegt, je näher er an seinem Centralkörper ist; das Gesetz, daß auch bei verschiedenen Planeten die Geschwindigkeit in genauer Beziehung steht zu dem Abstande der Planeten von der Sonne; das Gesetz, nach welchem die Umlaufzeit und der Abstand zweier Planeten von der Sonne in höchst einfachem Zusammenhange stehen; die gesetzmäßige Einwirkung verschiedener Planeten auf einander, wonach dieselben sich gegenseitig ein wenig aus ihren reinen Bahnen herauslenken; das Gesetz, welches die Ebbe und Fluth leitet, und noch eine Reihe von Gesetzen und gesetzmäßigen Wirkungen können mathematisch als Ausflüsse eines physikalischen Grundgesetzes nachgewiesen werden, des Newton'schen Gravitationsgesetzes, daß nämlich die Massen eine annähernde Wirkung auf einander ausüben, welche im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernungen steht. — Es ist bekannt, daß durch Reibung Wärme entsteht: Wagenachsen erhitzen sich bis zum Anschmelzen; durch Aneinanderreiben zweier Holzstücke erzeugen wilde Völker Feuer, wie wir unsere Streichhölzchen durch Reiben entzünden. In neuerer Zeit

hat man nachgeforscht, wie groß die Anstrengung sein muß, oder welche Arbeit beim Reiben geleistet werden muß, um eine bestimmte Menge von Wärme zu erzeugen. Man erwärmte Wasser durch Schütteln, man ließ metallene Arme durch Wasser und Quecksilber schlagen, man ließ einen stumpfen Meißel auf dem Boden eines mit Wasser gefüllten Kanonenrohres sich reibend herumdrehen. Immer zeigte sich dabei, daß durch Anwendung einer bestimmten Arbeit eine bestimmte Wärmemenge und durch Anwendung derselben Arbeit immer dieselbe Wärmemenge erzeugt wird. Auch durch Stoß entsteht Wärme: das Feuerschlagen mit Stahl und Stein; Schmiede können Nägel bis zum Glühen hämmern; Rammklötze werden heiß. Durch Anstellung genauerer Versuche hat man gefunden, daß auch beim Stoße durch Anwendung derselben Arbeit dieselbe Wärmemenge wie bei der Reibung erzeugt wird. Dasselbe Resultat ergaben auch Versuche, durch Zusammenpressen Wärme zu erzeugen: Eis schmilzt, wenn man es zusammendrückt; preßt man abgeschlossene Luft zusammen, so kann man durch die entstandene Hitze Zunder entzünden. — Umgekehrt wird durch Wärme Arbeit geleistet: die Dampfmaschine, die Heißluftmaschine werden durch die Wärme in Bewegung gesetzt; die Sonnenwärme bewegt die Luft und treibt dadurch Windmühlen und Segelschiffe; die Sonnenwärme verdunstet das Wasser und erhebt es dadurch, wonach es wieder herabfallend Mühlen aller Art treibt. Auch hier hat die Rechnung ergeben, daß durch Verwendung einer bestimmten Wärmemenge eine bestimmte Arbeit hervorgebracht wird, durch welche man wieder die ursprüngliche Wärmemenge erhalten könnte, wenn man die Arbeit etwa zu Reibung verwenden würde. So wie also Arbeit als solche verloren geht, wird sie in Wärme verwandelt; umgekehrt, wenn durch Wärme Arbeit geleistet wird, wird diese Wärme verzehrt, also in Arbeit verwandelt, und zwar geschehen diese zwei Verwandlungen unter allen Umständen in demselben Mengenverhältnisse. Wärme und Arbeit sind in bestimmter Menge in einander umwandelbar, sie sind in bestimmter Menge einander gleichgeltend. Dieser Satz von der Gleichwerthigkeit oder *Aequivalenz von Wärme und Arbeit* ist ein physikalisches Grundgesetz.

10 Die dritte Stufe in dem Verfahren der Physik ist die *Ermittelung der Ursachen der Erscheinungen* und die Zurückführung aller Ursachen auf eine oder wenige Grundursachen. Die Ursachen der Erscheinungen liegen einestheils in den Eigenschaften des Körpers, der die Erscheinung zeigt, anderntheils in den Einwirkungen anderer Körper auf den ersten. Da nun die Erfahrung zeigt, daß ein Körper für sich allein keine Veränderung an sich selbst vornehmen kann, so sind die eigentlich wirksamen Ursachen in den Einwirkungen anderer Körper zu suchen. *Diese Fähigkeit eines Körpers, auf einen anderen verändernd einzuwirken, nennen wir Kraft.* Diese Fähigkeit eines Körpers kann nur in seinen Eigenschaften liegen.*) Wenn man daher auf der zweiten Stufe zu Grundgesetzen durchgedrungen ist und dadurch Grundeigenschaften der Körper aufgefunden hat, so ist man auch an die Erkenntniß der Kräfte herangetreten und kann häufig einen Rückschluß auf das Wesen derselben aus den Grundgesetzen der Erscheinungen und aus den Grundeigenschaften der Körper ziehen.

Nach dem Newton'schen Gravitationsgesetze üben alle Körper eine annähernde Wirkung auf einander aus. Betrachtet man noch dazu den Zusammenhang der Theilchen eines Körpers, das Anhaften eines Körpers an einem anderen, die innere Festigkeit der chemischen Verbindungen, das Fallen der Körper zur Erde, so wird man zu dem Rückschlusse geführt, daß sowohl die Körper im Ganzen als auch die einzelnen Theilchen derselben eine anziehende Kraft auf einander ausüben. Diese Kraft wird als eine Grundursache der Erscheinungen, als eine Grundeigenschaft des Körperstoffes angesehen. Allerdings würde die Physik noch einen wesentlichen Fortschritt machen, wenn sie das Wesen dieser Kraft, den Grund ihrer Wirkungsart erklären könnte, wie es z. B. bei der Wärme der Fall ist. Das Wesen der Wärme sah man früher in der Abstoßung eines eigenen Stoffes, des Wärmestoffes. Jetzt hat man aber aus dem Satze über die Aequivalenz von Wärme und Arbeit einen Rückschluß auf das Wesen der Wärme gezogen. Man sagte: Da die Arbeit nur eine Körperbewegung ist, so muß auch die der Arbeit gleichwerthige Wärme, welche jeden Augenblick aus Arbeit entstehen und in dieselbe übergehen kann, eine Körperbewegung sein; eine fort-

*) Um irrthümlichen oder absichtlichen Mißdeutungen vorzubeugen, sei hier sogleich bemerkt, daß man unter Kraft nicht blos die Fähigkeit oder das Bestreben eines Körpers, auf einen anderen verändernd einzuwirken, versteht, sondern auch den Druck oder Zug, welcher hierbei zwischen den beiden Körpern stattfindet, ja auch sogar diesen Druck oder Zug verbunden mit der vorgegangenen Veränderung oder Bewegung.

schreitende oder drehende oder zitternde Bewegung der ganzen Körper ist sie, wie der Augenschein lehrt, nicht; also kann die Wärme nur in einer den Sinnen entgehenden, unendlich feinen Bewegung der Körpertheilchen bestehen. Für die Richtigkeit dieser Hypothese sprechen noch zwei früher schon angeführte Gründe. — In der eben angeführten Schlußweise ist man in unserer Zeit noch weiter gegangen. Auch andere Kräfte, wie z. B. die chemische Verwandtschaft, die Elektricität lassen sich in Massenbewegung oder Wärme umsetzen. Man glaubt daher auch das Wesen dieser, ja aller Kräfte in einer eigens gearteten, oft noch unbekannten Bewegung kleinster Theilchen sehen zu dürfen. So liegt z. B. die Vermuthung nahe, daß die Anziehung der Körper von dem Drucke des Weltäthers, von dem Stoße der Aetheratome herrühre. Wenn wirklich einmal alle Kräfte als Stoffbewegungen erkannt sein werden, so wird der innere Zusammenhang derselben, die Verwandlung einer Kraft in eine andere, leicht begreiflich und erklärlich sein. Alle Naturerscheinungen werden dann nur Bewegungsverwandlungen sein, und die Ursachen dieser Verwandlungen wird man nur in den Bewegungszuständen der auf einander einwirkenden Körper zu suchen haben. Die höchsten Resultate aller physikalischen Forschungen werden dann mit einigen Axiomen, einigen allgemeinen Grundsätzen übereinstimmen, mit den Sätzen: „Alle Ursachen sind Bewegungsursachen" und „Kräfte d. i. Bewegungen können wohl verwandelt, aber nicht vernichtet werden." Auf diesen Axiomen wird sich dann das ganze Lehrgebäude der Physik erheben. Doch sind wir noch weit von diesem Ziele entfernt.

Induction. Deduction. Das beschriebene Verfahren der Physik, von den **11** Resultaten der Beobachtung auf die Gesetze, und von diesen auf die Ursachen zu schließen, und dadurch in das Wesen der Erscheinungen *eingeführt* zu werden, nennt man *Induction*. Die Richtigkeit des durch Induction gefundenen Resultates bewährt sich, wenn es gelingt, das umgekehrte Verfahren einzuschlagen, d. h. die Erscheinung aus ihren Ursachen abzuleiten. Dies Verfahren nennt man *Deduction*. Es ist das eigentliche Ideal der Physik, in allen Gebieten, sowohl im Einzelnen, als auch im Ganzen, den Weg der Deduction einzuschlagen, und endlich das ganze Lehrgebäude auf dem Fundamente einiger Grundbegriffe, ähnlich wie in der Mathematik, zu erheben. Damit nur einstweilen der erste Theil dieses Ideales erreichbar scheine, müßte man die innere Bildung des Stoffes im Allgemeinen und den Grund der Stoffunterschiede kennen; außerdem müßte man über das Wesen der Kräfte im Klaren sein. Dann könnte man ableiten, wie sich ein bestimmter Körper unter der Einwirkung bestimmter Kräfte verändern müßte. Eine solche Ableitung wäre die vollständige *Erklärung* der Erscheinungen. Da man indessen noch nicht das Wesen aller Kräfte kennt, so geht man auch von Grundeigenschaften der Kräfte und Körper aus, und leitet aus diesen die Erscheinungen ab. Doch ist die blose Worterklärung nicht ausreichend; denn bei jeder Erscheinung treten Größen auf, welche ebenfalls durch die Deduction gefunden werden müssen; daher ist die einzig unanfechtbare Erklärung der Naturerscheinungen die *mathematische Deduction* derselben.

Da in einem „Lehrbuch für höhere Schulen" die höhere Mathematik nicht vorausgesetzt werden kann, und da diese häufig allein ausreicht zur mathematischen Deduction, so sind diesem Lehrbuche mancherlei Schranken gezogen. Außerdem ist das Wesen mancher Kräfte, wie z. B. der Elektricität und des Magnetismus noch unbekannt; für diese beiden Kräfte muß also jedenfalls der Weg der Induction beibehalten werden. Dagegen für die übrigen Gebiete der Physik, für die Lehre vom Schalle, vom Lichte und von der Wärme, sowie für die Bewegungserscheinungen der ganzen Körper ist in diesem Buche, so viel als bis jetzt möglich, der Weg der Deduction eingeschlagen worden. Doch muß der mathematischen oder logischen Ableitung eines Satzes immer der experimentelle Nachweis zur Seite stehen.

Eintheilung der Physik. Nach den Annahmen der neueren Physik sind alle **12** physikalischen Erscheinungen oder Zustandänderungen entweder Bewegungen ganzer Körper oder Bewegungen der kleinsten Körpertheilchen oder Moleküle; folglich theilen wir die Physik in die Lehre von der Körperbewegung oder die *Mechanik* und in die Lehre von der Molekularbewegung oder die *engere Physik*. Dem ersten Theile muß eine Einleitung voraus gehen, in welcher allgemeine Begriffe

und Sätze festgestellt und die Principien der Mechanik entwickelt werden, welche jetzt eigentlich die Principien der ganzen Physik geworden sind. Der erste Theil selbst zerfällt in 3 Abtheilungen: 1. Die Mechanik der festen Körper oder allgemeine Mechanik; denn viele der hier entwickelten Gesetze gelten auch für die flüssigen und luftförmigen Körper, sowie für die kleinsten Theilchen. 2. Die Mechanik der flüssigen Körper oder Hydromechanik (Hydraulik). 3. Die Mechanik der luftförmigen Körper oder Aëromechanik (Pneumatik). — Der zweite Theil zerfällt in 6 Abtheilungen: 1. Die Wellenlehre oder die allgemeine Lehre von der Molekularbewegung. 2. Die Lehre von dem Schalle oder die Akustik. 3. Die Lehre vom Lichte oder die Optik. 4. Die Lehre von der Wärme oder Calorik. 5. Die Lehre von dem Magnetismus. 6. Die Lehre von der Elektricität. Die beiden letzten Kräfte sind zwar noch nicht als Bewegungen der kleinsten Theilchen erkannt, stehen aber mit den drei vorausgehenden Abtheilungen in so vielfachem Zusammenhange, daß sie ebenfalls in die Lehre von der Molekularbewegung gehören.

Früher theilte man die Physik in die Lehre von den unwägbaren Dingen oder Imponderabilien, zu welchen das Licht, die Wärme u. s. w. gerechnet wurden, und in die Lehre von den wägbaren Dingen oder Ponderabilien. Die Physik des Wägbaren zerfiel in die Statik und die Dynamik; 'die erstere betrachtete die Körper im Zustande der Ruhe, die letztere im Zustande der Bewegung. Man uuterschied weiter die Statik der festen Körper, Geostatik, von der Statik der flüssigen Körper, Hydrostatik, und von der Statik der luftförmigen Körper, Aërostatik; ebenso unterschied man Geodynamik, die Lehre von der Bewegung der festen Körper, Hydrodynamik oder Hydraulik, die Lehre von der Bewegung der flüssigen Körper, und Aërodynamik, die Lehre von der Bewegung der luftförmigen Körper. Diese sechs Wissenschaften bilden für sich die große und wichtige Wissenschaft der Mechanik, welche ein eigenes Studium verlangt, und von welcher in der Physik nur die wichtigsten Sätze vorgetragen werden können. Aus diesem letzten Grunde schon erscheint die Eintheilung in Statik und Dynamik für ein kleineres Lehrbnch der Physik nicht geeignet; doch ist dieselbe auch in den meisten größeren Lehrbüchern verlassen worden, weil die Ruhe nur scheinbar ist oder als Resultat entgegengesetzter Bewegungen betrachtet werden kann. Außerdem hat man als Ursache der Ruhe das Gleichgewicht der auf einen Körper wirkenden Kräfte erkannt und daher die Lehre vom Gleichgewichte ebenfalls mit dem Worte Statik bezeichnet. Man hatte dabei übersehen, daß ein Gleichgewicht der Kräfte nicht blos an ruhenden Körpern vorkommt, sondern auch an solchen bewegten Körpern, die ihre Bewegung unverändert fortsetzen, und daß gerade dieses Gleichgewicht an bewegten Körpern die wesentlichste Aufgabe der theoretischen und praktischen Mechanik bildet. Die Lehre vom Gleichgewichte oder die Statik gehört daher nicht blos zu der Lehre von den ruhenden Körpern, zu der Statik, sondern auch zu der Lehre von den bewegten Körpern, zu der Dynamik, sie ist der wesentlichste Theil der ganzen Mechanik.

Einleitung.

I. Allgemeine Begriffe.

1. Der Raum.

Begriff und Messen des Raumes. Keiner der aufgestellten Begriffe des Raumes hat allgemeine Annahme gefunden. Nach der Erfahrung liegt jedoch eine Grundeigenschaft des Raumes darin, daß er sich nach unendlich vielen Richtungen erstreckt, d. h. daß man von einer Stelle desselben unendlich viele verschiedene Wege einschlagen kann. Doch lassen sich alle diese Richtungen aus 3 Hauptrichtungen oder Dimensionen zusammensetzen: vor uns hin (Länge), vor uns auf (Höhe oder Tiefe) und von uns weg (Breite oder Dicke). Der Raum hat also drei Dimensionen. 13

Die Physik muß den Weltraum zwar für unbegrenzt oder unendlich annehmen, zieht jedoch nur den begrenzten Raum und den ausgefüllten Raum in den Kreis ihrer Betrachtung. Ein ausgefüllter Raum wird physikalischer Körper, ein blos begrenzter Raum geometrischer Körper genannt. Die Grenzen eines Körpers sind die Flächen, d. h. solche Raumformen, welche nur 2 Dimensionen haben; die Grenzen der Flächen sind die Linien, d. h. solche Raumformen, welche nur 1 Dimension haben; die Grenzen der Linien sind die Punkte, d. h. solche Raumformen, die keine Dimension haben.

Wie alles Messen nur ein Vergleichen ist, so wird auch die Größe eines Raumes gemessen, indem man denselben mit einem anderen Raume vergleicht, der gesetzlich als Raumeinheit aufgestellt worden ist. Ebenso vergleicht man begrenzte Flächen und Linien mit der Flächen=Einheit und der Längen=Einheit. Der Punkt hat keine Größe, weil er keine Dimension hat.

Die Längen=Einheit hat man früher von dem menschlichen Körper genommen; Fuß und Elle sind auch jetzt noch vielfach verbreitete Längenmaße, sind aber in verschiedenen Ländern sehr verschieden und stimmen auch nicht mit der durchschnittlichen Größe des menschlichen Fußes und Vorderarmes überein. In dem Bestreben, eine unveränderliche und unverlierbare Grundlage des Längenmaßes, ein „Naturmaß" zu gewinnen, nahm man bei der allgemeinen Veränderung aller staatlichen Verhältnisse in der französischen Revolution die Erde als Fundament des Maßes an. Denn, wenn die Erde sich auch durch allmälige Abkühlung unseres Sonnensystems ändern sollte, so ist doch wenigstens seit 2000 Jahren eine merkliche Aenderung der Größe derselben nicht eingetreten. Es wurde daher das neue Längenmaß, das Meter, von der Erde genommen. Das Meter ist der 10=millionte Theil des Meridianquadranten der Pariser Sternwarte.

Durch astronomische Beobachtung konnte man finden, wieviele Grade oder 360stel des Meridians der Erdbogen zwischen der Insel Formentera (Pityusen) und Dünkirchen enthält; die Entfernung dieser Orte wurde auf das Genaueste gemessen. Aus derselben konnte man dann die Länge von 90° oder des ganzen Quadranten und daraus die Länge des 10-millionten Theiles desselben berechnen. — Zwar hat sich später herausgestellt, daß der genannte Quadrant = 10 000 856 Meter ist; allein dieses Maß hat in der Wissenschaft die weiteste Verbreitung, bietet in der Rechnung, wie im Leben große Vortheile und wurde daher sowohl

von Seiten der Wissenschaft als auch von volkswirthschaftlichen Congressen und staatlichen Maß-Commissionen zur allgemeinen Einführung empfohlen; so ist dasselbe denn auch im deutschen Reiche (1871) und in verschiedenen Staaten, wie auch in den englischen Colonien eingeführt worden, wodurch es von allen Maßen die weiteste Verbreitung auf der Erde gefunden hat. Auch in England wird die Einführung vorbereitet; dort ist seit 1824 die Länge des Secundenpendels = $0{,}9933^{m}$ als standard-yard dem Längenmaße zu Grunde gelegt.

Eintheilung des Meters.

1 Meter	=	10 Decimeter	=	100 Centimeter	=	1000 Millimeter.
		1 „	=	10 „	=	100 „
				1 „	=	10 „

Das Meter hat ungefähr die Länge der Strecke von der einen Schulter über die Brust bis an die Fingerspitze des ausgestreckten anderen Armes bei einem Manne von mittlerer Größe, das Decimeter ungefähr die Länge des Zeigefingers bis an den Knöchel, das Centimeter ist ungfähr so lang, als der Nagel des kleinen Fingers breit ist, und das Millimeter ist ungefähr so lang, als eine Violinsaite dick ist. Durch Beschluß des Bundesrathes vom 8. Oktober 1877 sind zur ausschließlichen Anwendung im amtlichen Verkehr und beim Unterricht folgende abgekürzte Bezeichnungen der Längeneinheiten verordnet:

1 Meter = 1^{m}, 1 Centimeter = 1^{cm}, 1 Millimeter = 1^{mm}; ebenso bezeichnen wir 1 Decimeter mit 1^{dm}. Demnach werden z. B. 7,83 Millimeter geschrieben $7{,}83^{mm}$; jedoch soll es auch freistehen zu schreiben 7,83 mm. Wir ziehen den Satz rechts oben vor, weil in diesem Buche die Zeichen auch mit Buchstaben verbunden vorkommen, wobei die zweite Bezeichnungsweise leichter Irrthümer erzeugen könnte.

Vielfache des Meters sind: 1 Dekameter = 10^{m}, 1 Hektometer = 100^{m}, 1 **Kilometer** (1^{km}) = 1000^{m}, das Maß für die Entfernung von Städten und Orten, etwas größer als eine Viertelwegstunde oder $^1/_8$ Meile; 1 Myriameter = 10000^{m}.

In alten Büchern findet man häufig Längen in Pariser Fußen angegeben. Ein Pariser Fuß (1′ Par.) = 325^{mm}, also fast $^1/_3{}^{m}$; man verwandelt demnach diese alten Fußangaben, jedoch ungenau, in Meter, indem man sie durch 3 dividirt. Der Pariser Fuß war in 12 Zolle (1′ = 12″) eingetheilt und der Zoll in 12 Linien (1″ = 12‴); diese veralteten Maße sind leider noch häufig an Barometern zu treffen. Auch der englische Fuß hat dieselbe Eintheilung, ist aber nur = 305^{mm}.

Für größere Entfernungen auf der Erde und für nähere Weltkörper dient noch als Längen-Einheit **die geographische Meile** (1 M.) = $^1/_{15}$ von einem Grade des Aequators = 7420^{m} = 4,611 engl. Meilen. Eine **englische Meile** = 1609^{m}, eine **Seemeile** = $^1/_4$ geogr. M. = 10 Kabellängen = 1000 Faden zu 6′. Wird die Seemeile benutzt, um die Fahrt eines Schiffes in einer Stunde anzugeben, so nennt man sie **Knoten**, weil die Zahl der Seemeilen an den Knoten der Logleine abgelesen wird. — Die größten Entfernungen, wie den Abstand der Fixsterne von einander gibt man in **Jahren Lichtzeit** an; 1 Jahr Lichtzeit ist der Weg, den das Licht (40000 M. in 1 Sec.) in 1 Jahre zurücklegt, = $1^1/_3$ Bill. M. Der nächste Fixstern (α Centauri) ist $3^1/_2$ Jahre Lichtzeit von uns entfernt, der Stern Alkyone im Siebengestirn nach Mädlers Hypothese 573 Jahre Lichtzeit; Durchmesser des Milchstraßenringes = 7700 Jahre Lichtzeit.

Zur Einheit des Flächenmaßes benutzt man ein solches Quadrat, dessen Seiten eine Längen-Einheit groß sind. Solche Flächen-Einheiten sind: Das Quadratmillimeter = 1^{qmm}, das Quadratcentimeter = 1^{qcm} = 100^{qmm}, das Quadratdecimeter = 1^{qdm} = 100^{qcm} = $10\,000^{qmm}$, das Quadratmeter = 1^{qm} = 100^{qdm} = $10\,000^{qcm}$ = $1\,000\,000^{qmm}$. Als Feldmaß wird benutzt das Quadratdekameter oder **Ar** = 1^{a} = 100^{qm} und das **Hektar** = 1^{ha} = 100^{a}. Zur Ausmessung der Länder dient das Quadratkilometer 1^{qkm} = $1\,000\,000^{qm}$ = $10\,000^{a}$ = 100^{ha}.

Als Einheit des Körpermaßes benutzt man einen Würfel (Cubus), dessen Kanten Längen-Einheiten und dessen Seiten daher Flächeneinheiten sind; ein solcher Würfel wird Cubik-Einheit genannt. Cubik-Einheiten sind: das Cubikcentimeter = 1^{ccm} = 1000^{cmm}, das Cubikdecimeter, als gebräuchliches Hohlmaß **Liter** benannt = 1^{l} = 2 hessischen Schoppen, das **Hektoliter** 1^{hl} = 100^{l}, das Cubikmeter = 1^{cbm} = 1000^{cdm} = $1\,000\,000^{ccm}$ = $1\,000\,000\,000^{cmm}$ (1^{cbm} = 64 c′ hess. = 32,34 c′ preußisch).

Der Vollständigkeit wegen mögen auch hier die vom Bundesrathe vorgeschriebenen abgekürzten Bezeichnungen der Gewichts-Einheiten folgen: 1 Gramm = 1^{g}, 1 Kilogramm = 1^{kg} = 1000^{g}, eine Tonne = 1^{t} = 1000^{kg}; 1 Milligramm = 1^{mg} = $0{,}001^{g}$. Der Verein deutscher Ingenieure schlägt außerdem noch folgende Abkürzungen vor: 1 Meterkilogramm = 1^{mk}, 1 Pferdestärke (Pferdeeffekt) = 1^{e}, 1 Atmosphärendruck = 1^{at}, 1 Calorie = 1^{c}, welche Abkürzungen in diesem Buche durchweg angewendet werden.

Die Geometrie lehrt, wie die Inhalte gesetzmäßig begrenzter Flächen und Körper durch Rechnung gefunden werden. Praktisch findet man das Volumen eines kleinen Körpers,

indem man denselben in ein theilweise mit Wasser gefülltes, graduirtes Glas wirft und beobachtet um wieviele Theilstriche oder Grade das Wasser gestiegen ist. Wenn z. B. das Gefäß nach ccm graduirt ist und das Wasser um 13 Theilstriche steigt, so nimmt der eingeworfene Körper einen Raum von 13ccm ein. — Die Volumina größerer, sowie pulverförmiger, poröser, schwammiger u. a. distracten Körper findet man mittels des Stereometers oder Volumenometers, s. 205, oder durch das specifische Gewicht, s. 164.

2. Die Zeit.

Begriff und Messen der Zeit. Was unter Zeit verstanden wird, läßt sich **14** zwar nicht durch einen Begriff bestimmen, ist aber aus der Erfahrung allgemein bekannt. Wir messen die Zeit, indem wir sie mit einem Zeitraume vergleichen, der allen Menschen bekannt ist und uns von der Natur selber dargeboten wird; am tauglichsten müssen dazu solche Zeiträume erscheinen, in welchen irgend eine regelmäßig wiederkehrende und die irdischen Verhältnisse regierende Bewegung im Bereiche der Natur vollbracht wird. Zum Messen größerer Zeiten bietet sich so von selbst jene Zeit dar, innerhalb deren die Erde ihre Bahn um die Sonne vollendet, oder in welcher sich die Sonne scheinbar um die Erde dreht. Dieser Zeitraum ist das Jahr. Zum Messen der kleinen Zeiten ist derselbe zu lang; dazu ist tauglicher die Zeit, welche die Erde zur Drehung um ihre Achse braucht, obwohl wir diese Bewegung selbst nicht wahrnehmen können; denn die aus derselben sich ergebende scheinbare Drehung des ganzen Sternenhimmels um die Erde kann deutlich wahrgenommen werden, indem jeder Stern im Osten aufsteigt, einen höchsten Punkt am Himmel erreicht und im Westen wieder herunter geht, um so seinen Kreis ganz in derselben Zeit zu vollenden, in welcher sich die Erde um sich selbst dreht. Man nennt diese Zeit einen Sterntag; er dient in der Astronomie zur Zeitmessung. Hierbei wird der Weg des Himmelspunktes zu Grunde gelegt, in welchem die Sonne im Augenblicke des Frühlingsanfanges steht, und den man Frühlingspunkt nennt. Hat dieser seine höchste Stelle am Himmel erreicht, so sagen die Astronomen, es sei Null Uhr Sternzeit. Da nun die Bewegung der Erde ganz gleichförmig ist, so braucht auch der Frühlingspunkt zu gleichen Wegen ganz gleiche Zeiten; der 24. Theil seiner Umdrehungszeit wird eine Stunde Sternzeit genannt. Es ist daher 5 Uhr Sternzeit, wenn der Frühlingspunkt um $^5/_{24}$ seines Kreises über den höchsten Punkt desselben hinaus ist, es ist 19 Uhr Sternzeit, wenn derselbe $^{19}/_{24}$ seines Weges zurückgelegt hat u. s. w.

An dieser gleichförmigen Drehung aller Gestirne von Osten nach Westen um die Erde nimmt die Sonne zwar auch Theil und bringt dadurch den Unterschied von Nacht und Tag hervor, der allein die Grundlage der bürgerlichen Zeitmessung bilden kann. Aber während die Sonne sich täglich um die Erde nach Westen dreht, legt sie auch von ihrer jährlichen scheinbaren Bahn um die Erde ein Stück nach Osten, ungefähr $^1/_{365}$ zurück. Wenn sie daher z. B. heute gleichzeitig mit einem gewissen Sterne aufgeht, so ist sie morgen um $^1/_{365}$ östlicher und kann demnach erst etwa 4 Min. später aufgehen. Es ist also der Tag der Sonne um etwa 4 Minuten länger als der Sterntag: die bürgerliche Zeit stimmt nicht mit der astronomischen überein. Außerdem sind die Sonnentage eines Jahres nicht gleich lang, weil die Sonne sich auf ihrer jährlichen Bahn bald schneller, bald langsamer bewegt, so daß sie bald mehr, bald weniger hinter den Sternen zurückbleibt. Und doch sind im bürgerlichen Leben nur gleiche Zeitmaße anwendbar. Man hat daher statt des wirklichen oder wahren Sonnentages für die bürgerliche Zeitmessung den mittleren Sonnentag eingeführt, d. i. einen solchen Zeitraum, welcher so oft genommen, als wahre Sonnentage im Jahre enthalten sind, auch genau die Jahreslänge gibt. Ein solcher mittlerer Sonnen-

tag wird in 25 Stunden getheilt zu 60 Minuten zu 60 Secunden zu 60 Tertien. Diese 24 Stunden werden bei uns in zwei Hälften gezählt, vom Mittage an, der Zeit des höchsten Sonnenstandes, und von Mitternacht an, der Zeit des tiefsten Sonnenstandes. Doch können unsere Uhren meist nicht 12 Uhr zeigen, wenn der wahre Mittag oder die wahre Mitternacht stattfindet. Den täglichen Unterschied zwischen der wahren und der mittleren Sonnenzeit nennt man die Zeitgleichung, von welcher wir eine kleine Tabelle beifügen.

Januar	1 . .	+ 4′	Mai	11 . .	— 3′	September	1 . .	0′
„	16 . .	+ 10′	„	20 . .	— 4′	„	8 . .	— 2′
Februar	1 . .	+ 13′	Juni	10 . .	— 1′	„	28 . .	— 9′
„	10 . .	+ 15′	„	15 . .	0	October	6 . .	— 12′
„	20 . .	+ 14′	„	20 . .	+ 1′	„	20 . .	— 15′
März	12 . .	+ 10′	Juli	10 . .	+ 5′	November	7 . .	— 16′
„	22 . .	+ 7′	„	20 . .	+ 6′	„	27 . .	— 12′
April	10 . .	+ 1′	August	9 . .	+ 4′	December	25 . .	— 4′
„	15 . .	0′	„	19 . .	+ 3′	„	14 . .	0.
„	21 . .	— 1′						

Eine solche Tabelle wird benutzt, wenn man eine Uhr nach der Sonne stellen will. Man beobachtet den wahren Mittag durch astronomische Mittel und fügt zu demselben die Zeitgleichung des betreffenden Tages; hierdurch erhält man die mittlere Zeit im wahren Mittag, d. i. die Zeit, auf welche die Uhren im Augenblicke des beobachteten wahren Mittags gestellt werden müssen. Wie die Tabelle zeigt, ist die Zeitgleichung gegen Ende des Jahres negativ; im Nov. beträgt sie sogar — 16′, d. h. im wahren Mittag stehen unsere Uhren auf 16′ weniger als Mittag, der wahre Mittag findet ¼ vor 12 statt; umgekehrt verhält es sich im Februar, wo die Zeitgleichung + 15′ beträgt, wo also der wahre Mittag auf ¼ nach 12 Uhr fällt. Die Erklärung für die erste Erscheinung liegt darin, daß die Erde am 2. Juli sich im Aphelium, also in ihrer kleinsten Geschwindigkeit befindet; deßhalb ist zu dieser Zeit auch die scheinbare Bewegung der Sonne am langsamsten, diese eilt auf ihrer täglichen Bahn einem Sterne am wenigsten voraus; der wahre Sonnentag ist nicht viel größer als der Sterntag, er ist kleiner als der mittlere Sonnentag: deßhalb findet der wahre Mittag vor dem mittleren statt. Da sich von jenem Tage an der Unterschied fortwährend vergrößert, so steigert er sich im Nov. bis zu 15 Minuten; um ebenso viel Zeit geht auch die Sonne für uns früher auf und unter, weßhalb im Nov. die Morgen heller sind als die Abende. Von dieser Zeit an nähert sich die Erde rasch dem am 1. Jan. eintretenden Perihelium und hiermit ihrer größten Geschwindigkeit; hierdurch wird die scheinbare Bewegung der Sonne zu dieser Zeit am größten, sie eilt einem Sterne am meisten voraus, der wahre Sonnentag übertrifft den Sterntag am meisten; er ist größer wie der mittlere Sonnentag. Im Februar fällt der wahre Mittag 15′ nach 12 Uhr; ebenso geht die Sonne später auf und unter, die Morgen sind dunkler als die Abende.

Ein bequemer und einfacher Apparat, um zu jeder Zeit, wenn die Sonne scheint, die wahre Sonnenzeit und durch Hinzufügung der Zeitgleichung die mittlere Sonnenzeit zu bestimmen, so genau, als dies für bürgerliche Verhältnisse wünschenswerth ist, wird für Jedermann geboten durch das Horoskop von Eble s. 581.

3. Ruhe und Bewegung.

15 Ein Körper ist in Ruhe, wenn alle Theile desselben zu verschiedenen Zeiten immer an demselben Raume verharren. Da jeder irdische Körper sich mit der Erde um deren Achse und um die Sonne dreht, auch an der Fortbewegung der Sonne, wahrscheinlich um den Schwerpunkt unseres Sternsystems, Antheil nimmt, so gibt es auf der Erde keinen Körper, der in Ruhe ist. Absolute Ruhe gibt es nicht. Wohl aber kann ein irdischer Körper seinen Ort auf der Erde behalten, also in Beziehung zur Erde in Ruhe sein; demnach gibt es relative Ruhe.

Befindet sich ein Körper in auf einander folgenden Zeiten in verschiedenen Räumen, so ist er in Bewegung. Weil jeder irdische Körper an so vielerlei Bewegungen Theil nimmt, die uns theilweise noch ganz unbekannt sind, und weil außerdem der Raum eines Körpers im Weltraume der Lage nach gar nicht angegeben werden kann, so ist auch die absolute Bewegung eines Körpers im

Weltraume unmöglich näher zu bestimmen. Indessen ist auch nur die relative Bewegung für uns von Wichtigkeit, d. i. die Ortsveränderung eines Körpers gegen einen anderen, z. B. gegen die Erde, wobei der andere Körper in Ruhe gedacht wird.

Zur näheren Bestimmung einer Bewegung muß angegeben werden:

1. die Form des Weges, welchen der Körper beschreibt, ob nämlich die Bahn eine gerade oder krumme, und welche krumme Linie sie ist. Sind die Bahnlinien aller Körperpunkte genau dieselben oder identisch, so ist die Bewegung eine fortschreitende; sind die Bahnformen der verschiedenen Punkte des bewegten Körpers nur einander ähnlich, so ist die Bewegung eine drehende, wälzende oder rotirende, eine Rotation; wird eine und dieselbe Bewegung oftmals wiederholt, indem der Körper immer wieder in die ursprüngliche Lage zurückkehrt, so nennt man dies eine schwingende oder vibrirende Bewegung; jede dieser wiederholten Bewegungen mit der zugehörigen Wiederkehr wird eine Schwingung, Vibration, Undulation, Oscillation genannt.

2. die Richtung der Bewegung; sie wird am besten angegeben durch den Winkel, den die Bahn mit irgend einer bekannten Richtung, z. B. der wagrechten (horizontalen) oder der lothrechten (verticalen) Richtung einschließt.

3. die Länge des Weges oder kurz der Weg.

4. die Zeit, welche der Körper für die Bewegung braucht. Zur Zählung der Secunden benutzt man genaue Uhren, Chronometer, in der Physik ein Secunden schlagendes Pendelwerk.

Wenn der Körper in beliebig kleinen gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt, so nennt man die Bewegung gleichförmig; eine ungleichförmige Bewegung findet statt, wenn der Körper in gleichen Zeiten ungleiche Wege zurücklegt. Werden die Wege in den folgenden gleichen Zeiten immer größer, so ist die Bewegung eine beschleunigte, im entgegengesetzten Falle eine verzögerte. Wenn die Wege in den folgenden gleichen Zeiten immer um gleich viel zunehmen, so nennt man die beschleunigte Bewegung eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; eine gleichförmig verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Wege in den auf einander folgenden gleichen Zeiten um gleich viel abnehmen.

Unter den zahlreichen Bewegungen der Weltkörper scheint es nur eine gleichförmige zu geben, nämlich die Drehung der Weltkörper um sich selbst. Wir sehen nämlich jede Bewegung um so rascher sich ändern, je mehr derselben entgegen gewirkt wird; auf losem Sandboden kommt eine geschobene Kegelkugel bald zur Ruhe, auf einer festgestampften Bahn rollt sie weiter, in der Luft fliegt eine abgeschossene Kugel noch weiter. Träte der Bewegung kein Hinderniß entgegen, so würde sie sich gar nicht ändern, sie wäre in diesem Falle gleichförmig; der Drehung der Weltkörper wirkt nichts entgegen*), daher ist sie gleichförmig. Wie eine Bewegung sich nicht ändert, wenn der sich bewegende Körper ausschließlich sich selbst überlassen ist, so ändert sich folgerichtig auch die Ruhe eines Körpers nicht, wenn derselbe keine Einwirkung erfährt. Ein ruhender Körper bleibt also ohne Einwirkung unverändert in Ruhe, ein bewegter Körper ändert ohne Einwirkung seine Bewegung nicht. Es ist dies eine allgemeine Eigenschaft der Körper, die man mit dem Namen Trägheit bezeichnet, und welche Newton als das erste Gesetz der Bewegung oder der Mechanik auffaßt, da sie bei allen Bewegungen den ersten Einfluß besitzt. Wir haben dieselbe später noch genauer zu betrachten. Wenn nun ein Körper an einer ihm mitgetheilten Bewegung aus sich selbst nichts ändern kann, sich vielmehr gegen eine äußere Einwirkung ganz passiv verhält, so muß er auch durch dieselbe Einwirkung immer wieder dieselbe Bewegung erhalten, einerlei ob er in Ruhe oder Bewegung ist. Diese durch zahlreiche Erfahrungen festgestellte und jeden Augenblick leicht zu prüfende Thatsache, daß ein Körper im bewegten Zustande dieselbe Wirkung durch einen äußeren Einfluß erfährt wie im Ruhestande, nennt Newton das zweite Gesetz der Mechanik. Legt hiernach ein Körper durch eine am Beginne eines gewissen Zeitraumes erfolgende Einwirkung in diesem Zeitraume einen gewissen Weg zurück, und ist er am Ende dieses Zeitraumes einer gleichen Einwirkung ausgesetzt, so wird er in dem folgenden gleichen Zeitraume den doppelten Weg zurücklegen, da zu der Bewegung, die er durch die erste Einwirkung erhielt, und die er nach dem Gesetze der Trägheit beibehalten muß, sich am Beginne des zweiten Zeitraumes nach dem zweiten

*) Von der in letzter Zeit besprochenen verzögernden Einwirkung von Ebbe und Fluth wollen wir hier schweigen, um die für den Schüler nöthige Klarheit der Entwicklung nicht zu stören.

Gesetze eine gleiche Bewegung addirt; ebenso wird er im dritten gleichen Zeitraume den dreifachen Weg zurücklegen, wenn im Beginne desselben sich die schon zweimal erfahrene Einwirkung abermals wiederholt u. s. w. Der Körper wird demnach eine beschleunigte Bewegung annehmen, und zwar eine sprungweise *gleichförmig beschleunigte*, weil die Wege nach gleichen Zeiten um gleichviel zunehmen. Eine vollkommen gleichförmig beschleunigte Bewegung wird eintreten, wenn dieselbe Einwirkung unaufhörlich stattfindet; umgekehrt, wenn ein Körper eine unaufhörlich beschleunigte Bewegung besitzt, so muß er eine unaufhörliche Einwirkung erfahren. So ist das Fallen der Körper eine beschleunigte und zwar eine gleichförmig beschleunigte Bewegung, die unaufhörlich schneller wird. Wir können hieraus schließen, daß auf einen fallenden Körper unaufhörlich etwas einwirkt. Da das Fallen in gleicher Weise rings um die Erde herum stattfindet, so liegt der Gedanke nahe, die Einwirkung könne von der Erde ausgehen; und da alle Körper beim Fallen sich nach der Erde hin bewegen, so schreibt man der Erde eine anziehende Einwirkung auf die Körper, eine Anziehung zu. Dieselbe Einwirkung geschieht nach dem zweiten Gesetze auf einen senkrecht in die Höhe geworfenen Körper; sie wirkt dem Aufsteigen fortwährend entgegen und vermindert die Wege, welche der Körper in einzelnen Zeiträumen beim Steigen zurücklegt, und zwar um eben so viel, als sie die Wege in denselben Zeiträumen beim Fallen vergrößerte. Das Aufsteigen eines senkrecht in die Höhe geschleuderten Körpers ist demnach eine verzögerte, und zwar eine *gleichförmig verzögerte* Bewegung.

5. *Die Geschwindigkeit der Bewegung.* Legt ein Körper in kurzer Zeit einen großen Weg zurück, so sagt man im gewöhnlichen Leben, er habe eine große Geschwindigkeit; macht er dagegen in langer Zeit einen kleinen Weg, so sprechen wir von kleiner Geschwindigkeit. Da die Geschwindigkeit in Rechnungen eingeführt wird, so muß sie als eine bestimmte Größe definirt werden, wofür sich offenbar der Weg in einer gewissen Zeit eignet; hierdurch sind in der Mechanik folgende Begriffsbestimmungen entstanden:

a. *Bei der gleichförmigen Bewegung versteht man unter Geschwindigkeit den Weg, welcher wirklich in jeder Secunde zurückgelegt wird* (unter Secunde ist hier die mittlere Sonnensecunde zu verstehen).

b. Bei der ungleichförmigen Bewegung muß zwischen der wahren Geschwindigkeit in einem bestimmten Augenblicke und der Mittelgeschwindigkeit während eines bestimmten Zeitraumes unterschieden werden.

Unter der wahren Geschwindigkeit in einem bestimmten Augenblicke versteht man den Weg, welcher von da in jeder Secunde zurückgelegt werden würde, wenn der Bewegungszustand sich nicht weiter veränderte.

Unter der Mittelgeschwindigkeit während eines bestimmten Zeitraumes versteht man den Weg, welcher während dieser Zeit durchschnittlich in einer Secunde zurückgelegt wird.

15a **Lehrsatz der Mittelgeschwindigkeit.** Bei der gleichförmig beschleunigten und der gleichförmig verzögerten Bewegung *ist die Mittelgeschwindigkeit gleich dem arithmetischen Mittel d. h. gleich der halben Summe aus der wahren Anfangs- und Endgeschwindigkeit des betreffenden Zeitraumes.* Beweis: Die wahre Geschwindigkeit nimmt z. B. bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung in der ersten Hälfte des Zeitraumes eben so viel zu, wie in der zweiten Hälfte; folglich ist in der Mitte dieses Zeitraumes jedenfalls jene Mittelgeschwindigkeit wirklich vorhanden. In einem beliebigen Zeitpunkte vor der Mitte ist aber die wahre Geschwindigkeit eben so viel unter jener mittleren, als sie in dem entsprechenden Zeitpunkte nach der Mitte über derselben ist; was in dem ersten Zeitpunkte an der Mittelgeschwindigkeit fehlt, wird in dem zweiten ersetzt. Der Verlauf der Bewegung ist demnach, was den Weg anbelangt, ein solcher, als ob der Körper während des ganzen Zeitraumes sich mit der Mittelgeschwindigkeit bewegt hätte.

Ist demnach die Mittelgeschwindigkeit bekannt, so gibt sie die Geschwindigkeit

an, mit welcher sich ein Punkt während des betreffenden Zeitraumes gleichförmig bewegen müßte, um den nämlichen Weg zurückzulegen, der bei der ungleichförmigen Bewegung gemacht wird; insofern läßt sich also nach Ermittelung der Mittelgeschwindigkeit die ungleichförmige Bewegung auf die gleichförmige reduciren.

c. Bei der ungleichförmigen Bewegung versteht man unter *Acceleration oder Beschleunigung den Zuwachs der Geschwindigkeit in einer Secunde*. Einen eigentlichen Zuwachs hat die beschleunigte Bewegung; die verzögerte Bewegung hat eine Abnahme oder Retardation. Indessen können die verzögerte, wie auch die gleichförmige Bewegung als specielle Fälle der beschleunigten Bewegung aufgefaßt werden; bei der eigentlichen beschleunigten Bewegung ist dann die Acceleration positiv, bei der verzögerten negativ, bei der gleichförmigen positiv und negativ zugleich, d. h. gleich Null zu nehmen. Behält die Acceleration ihre Größe unverändert bei, bleibt, wie man sich ausdrückt, die Acceleration constant, so ist die Bewegung eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte.

Nach diesen Feststellungen des Begriffs der Geschwindigkeit lassen sich die *Definitionen* der verschiedenen Bewegung schärfer geben: die gleichförmige Bewegung ist diejenige, bei welcher die Geschwindigkeit constant bleibt; die ungleichförmige Bewegung ist diejenige, bei welcher die Geschwindigkeit variabel ist; sie ist beschleunigt oder verzögert, je nachdem die Acceleration positiv oder negativ ist. Eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Acceleration constant ist; eine ungleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Acceleration variabel ist.

Hinsichtlich der Buchstabenbezeichnung der eben betrachteten Größen haben sich allmälig in den Lehrbüchern und Studien aller Länder gewisse Gebräuche festgestellt, denen wir uns der Gleichmäßigkeit halber anschließen wollen. So bedeutet

c = celeritas = Geschwindigkeit, erinnert zugleich an constant.
v = velocitas = " " " variabel.
a = acceleratio = Beschleunigung.
g = gravitas = Beschleunigung der Schwere.
s = spatium = Weg.
t = tempus = Zeit.

Tafel bemerkenswerther Geschwindigkeiten.

Ein guter Fußgänger	1,6	Meter
Ein Pferd im Schritt	0,9—1,1	=
Ein Pferd im Trab	2—2,2	=
Ein Pferd im Galopp	4—5	=
Die besten Renner	12	=
Personen-Eisenbahnzug	7—8	=
Schnellzug	14	=
Schnellstes Seedampfschiff, 18 Knoten in 1 St.	9	=
Der Rhein zwischen Worms und Mainz . .	1	=
Gewöhnlicher Wind	3—10	=
Heftiger Sturm	30—50	=
Gewöhnliche Flintenkugel	300—400	=
Büchsenkugel	500	=
Granate der deutschen 9cm-Kanone	300	=
Langgranate der 15cm-Ringkanone	500	=
Ein frei fallender Körper nach einer Secunde	9,808	=
Der Schall in der freien Luft	333	=
Das Licht im leeren Raume	40000	Meilen
Die Elektricität in mäßig langem Kupferdraht	63000	=
Der Mond auf seiner Bahn um die Erde .	1/7—1/8	=
Die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne .	4	=
Der erste und der letzte Planet	6½ u. ⅔	=
Die Sonne in ihrer wahrsch. B. um Alkyone	7⅓	=
Die Kometen in der Sonnennähe	bis 60	=

16 **Gesetze der Bewegung. Phoronomie. Kinematik.** 1. Gesetze der gleichförmigen Bewegung. Da die constante Geschwindigkeit c der gleichförmigen Bewegung den Weg in 1 Sec. bedeutet, so ist der Weg s in t Sec. das t-fache von c; also sind die Gesetze der gleichförmigen Bewegung:

$$1)\ s = c.t;\quad 2)\ c = s/t;\quad 3)\ t = s/c \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

Aufgaben. 1. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Aequatorbewohners bei der täglichen Drehung um die Erdachse? Aufl. $c = s/t = 464^m$. — A. 2. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Bewohners von Mainz? Aufl. Der Parallelkreis von Mainz $= 5400 . \cos 50^0 = 3471$ M., folglich $c = 298^m$. — A. 3. Wie groß ist die Geschw. der Erde um die Sonne, wenn sie 20 Mill. M. von derselben entfernt ist. Aufl. $c = 4$ M. c^a. — A. 4. Wieviele Umdrehungen macht ein Schwungrad von 2^m Radius in einer Stunde, wenn die Geschw. desselben am Umfange 6^{cm} beträgt? Aufl. 1719 Umdrehungen. — A. 5. Wie groß ist die Entf. des Sternes α Centauri von uns in M. ausgedrückt? Aufl. $s = ct = 40000 . (3^1/_2 . 365 . 24 . 60 . 60) = 4415040$ Mill. M. — A. 6. Wie viele Tage braucht das schnellste Eilbot (18 Knoten die Stunde), um von Liverpool nach New-York (720 M.) zu fahren? Aufl. $t = s / c = (720 \cdot 4 / 18) : 24 = 6^2/_3$ T.

2. Gesetze der ungleichförmigen Bewegung. Beginnt eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung mit der Geschwindigkeit c, so ist der Zuwachs an Geschwindigkeit in t Sec. $+ at$ oder $- at$, je nachdem die Bewegung gleichförmig beschleunigt oder verzögert ist; folglich ist die Geschwindigkeit nach t Sec.

$$v = c \pm at \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Fängt die beschleunigte Bewegung vom Ruhezustande an, so ist $c = 0$, also $v = at$. In diesem wichtigsten Falle verhalten sich also die Geschwindigkeiten wie die Zeiten. Endigt die verzögerte Bewegung mit dem Ruhezustande, so ist $v = 0$, also $0 = c - at$; dies ist der Fall, wenn $c = at$, also wenn $t = c/a$. Diese Formel gibt an, nach welcher Zeit ein verzögert bewegter Körper stille steht.

Zur Bestimmung des Weges in den t ersten Secunden für den wichtigsten Fall, daß eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Geschwindigkeit 0 beginnt, gelangen wir auf folgende Art: Nach t Sec. ist in diesem Falle die Geschwindigkeit $v = at$, also ist die Mittelgeschwindigkeit $= {}^1/_2\,(0 + v) = {}^1/_2\, at$; es wird in Wirklichkeit derselbe Weg zurückgelegt, der bei gleichförmiger Bewegung in t Sec. mit der constanten Mittelgeschwindigkeit ${}^1/_2\, at$ zurückgelegt würde; dieser letztere ist aber $= {}^1/_2\, at . t = {}^1/_2\, at^2$; also ist bei der gleichförmig beschleunigten, vom Ruhezustande beginnenden Bewegung der Weg in den t ersten Secunden

$$s = {}^1/_2\, at^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

In diesem wichtigsten Falle verhalten sich demnach die Wege wie die Quadrate der Zeiten. Es ist von Interesse, für diesen Fall den Weg auch durch die Geschwindigkeit und umgekehrt auszudrücken; dies kann geschehen, indem man aus den Formeln (2) $v = at$ und (3) $s = {}^1/_2\, at^2$ die Größe t eliminirt, was auf verschiedene Art vorgenommen werden kann. Könnte man z. B. die Gleichungen (2) und (3) so transformiren, daß die neuen rechten Seiten einander gleich wären, so wären auch die neuen linken Seiten einander gleich, und durch wirkliche Gleichsetzung derselben erhielte man die gesuchte Relation zwischen v und s. Die Ausführung dieses Gedankens gelingt, wenn man in (2) beide Seiten quadrirt und in (1) beide Seiten mit 2a multiplicirt:

$$\left.\begin{aligned} v^2 &= a^2t^2 \\ 2as &= a^2t^2 \end{aligned}\right\} v^2 = 2as, \text{ woraus } v = \sqrt{2as} \text{ und } s = \frac{v^2}{2a} \quad \ldots\ldots (4)$$

In diesem wichtigsten Falle verhalten sich also die Geschwindigkeiten auch wie die Quadratwurzeln aus den zurückgelegten Wegen, und die Wege auch wie die Quadrate der Geschwindigkeiten.

Für den Fall, daß eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Geschwindigkeit c beginnt, läßt sich der in den t ersten Secunden zurückgelegte Weg auf doppelte Art bestimmen. Entweder kann man diesen Weg als eine Summe

zweier Wege auffassen, von welchen der eine $= ct$ in Folge der Anfangsgeschwindigkeit c allein, und der andere $= \frac{1}{2} at^2$ in Folge der stattfindenden Beschleunigung zurückgelegt wird, wodurch man erhält $s = ct + \frac{1}{2} at^2$. Oder man reducirt die gleichförmig beschleunigte Bewegung mit Hilfe der Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}\{c + (c + at)\} = c + \frac{1}{2} at$ auf eine gleichförmige, wodurch man ebenfalls erhält $s = t\,(c + \frac{1}{2} at) = ct + \frac{1}{2} at^2$. In derselben doppelten Weise läßt sich auch der Weg für die gleichförmig verzögerte Bewegung bestimmen; jedoch finden wir denselben am einfachsten aus der letzten Formel, wenn wir in derselben $(-a)$ statt a setzen, wodurch entsteht $s = ct - \frac{1}{2} at^2$. Der Weg in den ersten t Secunden bei der gleichförmig beschleunigten oder verzögerten Bewegung ist demnach

$$s = ct \pm \tfrac{1}{2} at^2 \qquad (5)$$

Wie wir oben den Weg für eine mit dem Ruhezustande beginnende gleichförmig beschleunigte Bewegung bestimmten, so können wir hier den Weg für eine mit dem Ruhezustande endigende gleichförmig verzögerte Bewegung finden, indem wir einfach die Zeit $t = c/a$, nach welcher, wie oben gefunden, ein verzögerter Körper stille steht, in die Formel $s = ct - \frac{1}{2} at^2 = (c - \frac{1}{2} at).t$ für den Weg bei der gleichförmig verzögerten Bewegung einsetzen. Wir erhalten dann $s = (c - \frac{1}{2} c).c/a = c^2/2a$. Noch einfacher gelangen wir zu diesem Werthe, wenn wir die gleichförmig verzögerte Bewegung mit Hilfe der Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}(c + 0) = \frac{1}{2} c$ auf eine gleichförmige reduciren; es ergibt sich dann $s = c.t = \frac{1}{2} c.c/a = c^2/2a$. Dieser Werth für den Weg bei der gleichförmig verzögerten Bewegung, die mit Ruhe endigt, stimmt vollständig überein mit dem Wege bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung, die mit Ruhe beginnt und mit der Geschwindigkeit c endigt; denn setzen wir in der zweiten Formel (4) statt v das hier geltende c, so ist s ebenfalls $= c^2/2a$. Ein gleichförmig verzögerter Körper, der mit der Geschwindigkeit c beginnt und mit 0 endigt, legt demnach denselben Weg zurück, wie ein gleichförmig beschleunigter Körper, der bei gleicher Acceleration mit 0 beginnt und mit c endigt. Umgekehrt wenn $v^2/2a = c^2/2a$, so ist $v = c$; sind also die Wege bei einer von der Ruhe beginnenden gleichförmig beschleunigten und bei einer mit der Ruhe endigenden gleichförmig verzögerten Bewegung einander gleich, so ist die Schlußgeschwindigkeit jener gleich der Anfangsgeschwindigkeit dieser Bewegung. So kommt eine senkrecht in die Höhe geschossene Kugel mit ihrer Anfangsgeschwindigkeit wieder am Boden an.

Wie für diese Bewegungen die Geschwindigkeit durch den Weg und umgekehrt ausgedrückt werden konnte, so lassen sich auch für die mit einer Geschwindigkeit c beginnende gleichförmig beschleunigte und für die mit einer Geschwindigkeit c aufhörende gleichförmig verzögerte Bewegung nach derselben Methode Beziehungen zwischen Weg und Geschwindigkeit auffinden. Für erstere gelten nach Fl. (2) und (4) die Gleichungen

$$v = c + at \text{ und } s = ct + \tfrac{1}{2} at^2, \text{ für letztere}$$
$$v = c - at \text{ und } s = ct - \tfrac{1}{2} at^2.$$

Wenn man in beiden Fällen jede Seite der ersten Gleichung quadrirt, sodann jede Seite der zweiten Gleichung mit 2a multiplicirt, und endlich die transformirten Gleichungen verbindet, im ersten Falle durch Subtraction, im letzten durch Addition, so erhält man für die gleichförmig beschleunigte Bewegung die Beziehungen

$$v = \sqrt{c^2 + 2as} = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} + s\right)} \text{ und } s = \frac{v^2 - c^2}{2a} = \frac{(v + c)\,(v - c)}{2a}$$

und für die gleichförmig verzögerte Bewegung die analogen Beziehungen

$$v = \sqrt{c^2 - 2as} = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} - s\right)} \text{ und } s = \frac{c^2 - v^2}{2a} = \frac{(c - v)\,(c + v)}{2a}$$

Die Formeln des zweiten Falles entstehen, wie es sein muß, aus denjenigen des ersten Falles, wenn man in diesen $(-a)$ an die Stelle von a treten läßt. Alle Formeln lassen sich auch auf folgende Weise ableiten. Beginnt ein Körper eine gleichmäßig beschleunigte

Bewegung mit der Geschw. c, so kann man sich vorstellen, diese Anfangsgeschwindigkeit sei dadurch entstanden, daß der Körper bereits vorher den Weg $c^2/2a$ mit der Acceleration a und der Anfangsgeschw. 0 zurückgelegt habe; dann ist sofort klar, daß der Weg s als eine Differenz zweier Wege darstellbar ist; nämlich

$$s = \frac{v^2}{2a} - \frac{c^2}{2a} = \frac{v^2 - c^2}{2a}$$

Durch die gleiche Erwägung leitet man auch die Formel für v ab:

$$v = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} + s\right)} = \sqrt{c^2 + 2as}$$

Beginnt aber ein Körper eine gleichförmig verzögerte Bewegung mit der Geschw. c, so ist zu bedenken, daß nach Zurücklegung des Weges $c^2/2a$ die Geschw. = 0 ist; hat sich aber die Geschw. erst auf den Betrag v vermindert, so könnte, bis die Geschw. = 0 wird, noch der Weg $v^2/2a$ gemacht werden; auch hier erhält man daher den Weg s als eine Differenz zweier Wege:

$$s = \frac{c^2}{2a} - \frac{v^2}{2a} = \frac{c^2 - v^2}{2a} \text{ und ebenso } v = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} - s\right)} = \sqrt{c^2 - 2as}$$

Aus den Formeln des zweiten Falles ergibt sich eine frühere Folgerung in höchst einfacher Weise; aus der Fl. für v liest man sofort ab, daß $v = 0$ nur, wenn $s = c^2/2a$, womit der Maximalweg σ bis zum Ruhestande, also z. B. beim Steigen die Steighöhe gefunden ist; aus der Formel für s liest man ab, daß $s = 0$, wenn $v^2 = c^2$, also wenn $v = \pm c$, d. h. daß der Körper durch das Zurücklaufen von der äußersten Stelle bis zum Ausgangspunkte seine Anfangsgeschwindigkeit bei entgegengesetzter Richtung, worauf das entgegengesetzte Vorzeichen hindeutet, wieder erlangt.

Die Hauptgesetze 2, 3 und 4 der gleichförmig beschleunigten oder verzögerten Bewegung lassen sich mit Atwoods Fallmaschine nachweisen; da diese jedoch hier noch nicht verstanden werden kann, so mag es genügen, mittels einiger Fallversuche wenigstens das Gesetz (3) und damit eigentlich auch die übrigen, da sie in einem inneren Zusammenhange stehen, zur Klarheit zu bringen. Der freie Fall ist nämlich, wie schon erwähnt, eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; folglich muß das Gesetz (3) für denselben gelten. Steht uns ein Thurm zu Gebote, der in einer Höhe von 45^m ein Fenster hat, und lassen wir aus demselben eine Bleikugel fallen, so hören wir dieselbe nach 3 Sec. aufschlagen. Nach Fl. (3) ist also $45 = \frac{1}{2} a \cdot 3^2$, woraus $a = 10^m$. Hierdurch haben wir erfahren, daß die Acceleration der Fallbewegung 10^m beträgt, daß also die Erde durch ihre Anziehung einem Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^m ertheilt, weßhalb man diese allgemein mit g bezeichnete Größe auch die Acceleration der Erdschwere oder Gravitation nennt. Lassen wir nun die Kugel aus 20^m niederfallen, so ist nach derselben Fl. $20 = 5t^2$, woraus $t = 2$ Sec.; die Kugel muß also, wenn unsere Gesetze richtig sind, nach 2 Sec. auf dem Boden anlangen, und wirklich bestätigt das Aufschlagen nach 2 Sec. die Richtigkeit derselben. Bringen wir sie in eine Höhe von 5^m, so gilt die Gl. $5 = 5t^2$, woraus $t = 1$ Sec., was abermals die Richtigkeit der Formel bestätigt. Man kann die Versuche noch in mannigfacher Weise verändern, und immer werden sie die Formeln und die in denselben enthaltenen Gesetze bestätigen. Auch für die gleichförmig verzögerte Bewegung lassen sich ähnliche Versuche anstellen, wenn uns ein Mittel zu Gebote steht, einen Körper mit bestimmter Geschwindigkeit senkrecht aufwärts zu werfen; denn wie die Erde einem frei fallenden Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^m ertheilt, so vermindert sie auch die Geschw. eines senkrecht aufsteigenden Körpers in jeder Sec. um 10^m; das senkrechte Aufsteigen eines geschleuderten Körpers ist demnach eine gleichförmig verzögerte Bewegung mit der Retardation oder negativen Acceleration 10^m. Wir können daher die Steigzeit nach Fl. (2) berechnen und finden dieselbe $= \frac{1}{10} v$ Sec. Wenn nun wirklich der Körper mit derselben Geschw. v wieder am Boden anlangt, dann muß nach (2) seine Fallzeit $= v/g$ ebenfalls $= \frac{1}{10} v$ sein, so daß er nach $\frac{1}{5} v$ Sec. immer wieder anlangen muß, was man in jedem Falle bestätigt findet. Auch Versuche über die Steighöhe lassen sich unter den angegebenen Voraussetzungen anstellen, um die Formel $s = c^2/2a$ zu bestätigen, oder das Gesetz, daß die Steighöhe im geraden Verhältnisse zum Quadrate der Anfangsgeschwindigkeit steht. Wird ein Körper mit einer Geschw. von 10^m senkrecht aufwärts geworfen, so steigt er $10^2/(2 . 10) = 5^m$ hoch; beträgt seine anfängliche Geschw. 20^m, so erreicht er eine Höhe von 20^m, steigt also bei 2facher Geschw. zur 4fachen Höhe; beginnt er mit einer Geschw. von 30^m aufzusteigen, so ist seine Steighöhe 45^m, ist also bei 3facher Geschw. 9mal so groß; ebenso erreicht er bei 4, 5, 6 . . . . facher Geschw. eine 16, 25, 36 . . . . fache Höhe. Steht ein Mittel zu Gebote, die Geschw. zu messen, so findet man, daß der Körper immer mit derselben Geschw. wieder zu Boden fällt, mit der er von demselben fortgeschleudert wurde.

Aufgabe. 7. Eine Locomotive erlangt beim Anlaufe in jeder Sec. eine Geschw. von 2^{dm}; wann ist die Geschw. = 12^{m} geworden, und welchen Weg hat sie bis dahin zurückgelegt? Nach Formel (2) ist $t = v / a = 60$ Sec.; nach Formel (3) ist $s = 360^{m}$. — A. 8. Ein Zug von 12^{m} Geschw. verliert beim Endlaufe in jeder Sec. 3^{dm} Geschw.; wann und nach welchem Wege wird er zur Ruhe kommen. Aufl. Nach (2) $t = 40$ Sec.; nach (5) $s = 240^{m}$. — A. 9. Beim freien Falle erlangt ein Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^{m}; welche Geschw. erhält er und welchen Weg durchläuft er in 6 Sec.? Aufl. Nach (2) $v = 60^{m}$, nach (3) $s = 180^{m}$. — A. 10. Ein senkrecht aufwärts geworfener Körper verliert in jeder Sec. 10^{m} Geschw.; wie lange und wie hoch steigt eine senkrecht aufwärts geschossene Büchsenkugel? Aufl. Nach (2) $t = 50$ Sec.; nach (5) $s = 12500^{m}$.

17 **Bauers Beweis der Wegformeln** (1877). Der Beweis des Lehrsatzes für die Mittelgeschwindigkeit in 15a entbehrt der wünschenswerthen Strenge, ist aber auf der entsprechenden mathematischen Vorbildungsstufe der Schüler wohl kaum in aller Strenge möglich; da jedoch die aus demselben hervorgehenden Wegformeln die Grundlage der ganzen theoretischen Physik bilden, so möge hier noch angegeben werden, wie dieselben für weiter vorgebildete Schüler unzweifelhaft festzustellen sind. Wenn die Gesetze der Flächenberechnung vorausgesetzt werden können, so lassen sich die Wegformeln durch die graphische Darstellung der Bewegung ableiten, was in meinen „Elementen der Physik" geschehen ist. Eine rein algebraische Ableitung, die jedoch die Lehre von den Progressionen voraussetzt, wurde von Prof. K. L. Bauer in Carlsruhe in Hoffmanns Zeitschrift veröffentlicht, aus der wir den Beweis der Hauptformel entnehmen. Dieselbe heißt $s = \frac{1}{2} vt$ oder der Weg in den t ersten Secunden einer vom Ruhezustande beginnenden und mit der Geschwindigkeit v endigenden gleichförmig beschleunigten Bewegung ist gleich dem halben Product aus der Endgeschwindigkeit in die Zeit.

Beweis. Denken wir uns die Zeit t in n gleiche Zeittheilchen zerlegt, jedes = t/n Sec., so nimmt die Geschw. während jedes Theilchens um v/n zu; denn in den t ersten Sec. wächst die Geschw. von 0 bis v, d. h. um v, also im nten Theil dieser Zeit um den nten Theil von v, also um v/n. Am Anfange des 1. Zeittheilchens ist sie noch = 0 oder = 0 . v/n; also am Ende des

1ten, 2ten, 3ten . . . . (n — 1) ten, nten Zeittheilchens gleich
1 . v/n 2 . v/n 3 . v/n . . . . (n — 1) v/n, n . v/n.

Macht man nun die Annahme, die Bewegung sei während jedes Zeittheilchens gleichförmig, so wird bekanntlich der Weg durch das Product der Geschw. und der Zeit gemessen. Nimmt man bei der Ausrechnung dieser Theilwege für jedes Theilchen die Anfangsgeschw., so wird jeder Theilweg zu klein; nimmt man aber die Endgeschw., so wird jeder Theilweg zu groß. Und werden dann die Wege in allen Zeittheilchen addirt, so ist die Summe s_1 der Theilwege der ersten Art offenbar kleiner als der wirkliche Weg s und die Summe s_2 der Theilwege der zweiten Art größer als der wirkliche Weg s. Nun ist aber

$$s_1 = 0 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + 1 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + 2 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + \ldots . + (n-1) \frac{v}{n} . \frac{t}{n} =$$

$$\frac{vt}{n^2} \left(0 + 1 + 2 + \ldots (n-1) \right) = \frac{vt}{n^2} . \frac{n(n-1)}{2} = \frac{1}{2} vt \left(1 - \frac{1}{n} \right)$$

$$s_2 = 1 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + 2 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + 3 . \frac{v}{n} . \frac{t}{n} + \ldots . . n \frac{v}{n} . \frac{t}{n} =$$

$$\frac{vt}{n^2} \left(1 + 2 + 3 + \ldots . n \right) \frac{vt}{n^2} . \frac{n(n+1)}{2} = \frac{1}{2} vt \left(1 + \frac{1}{n} \right)$$

Folglich liegt der wirkliche Weg s zwischen $\frac{1}{2} vt (1 - 1/n)$ und $\frac{1}{2} vt (1 + 1/n)$. Da es nun in unserem Belieben steht, n so groß zu nehmen als möglich, so können wir n auch als unendlich groß annehmen, wodurch $1/n = 0$ wird. Demnach liegt der Weg s zwischen $\frac{1}{2} vt$ und $\frac{1}{2} vt$, ist also $= \frac{1}{2} vt$. Setzt man hierin statt v seinen Werth at, so erhält man die Fl. (3) und daraus alle übrigen.

Aufg. 11. Wie lang ist das Rohr einer 9^{cm}-Kanone, wenn das Geschoß beim Abschießen in $\frac{1}{150}$ Sec. durch das Rohr fliegt? Aufl. $s = \frac{1}{2} vt = \frac{1}{2} . 300 . \frac{1}{150} = 1^{m}$. — A. 12. Welche Zeit braucht eine Büchsenkugel, um beim Abschießen das 80^{cm} lange Büchsenrohr zu durchlaufen? Aufl. $t = s / \frac{1}{2} v = 0{,}8 / 250 = 0{,}0032$ Sec. — A. 13. Welche Geschw. erreicht ein Courierzug in einem Anlaufe, der auf einer Strecke von 200^{m} 25 Sec. dauert? Aufl. $v = 2s / t = 400 / 25 = 16^{m}$.

4. Stoff oder Materie.

18 **Begriff und innere Bildung des Stoffes.** Was einen Raum erfüllt, nennen wir Stoff oder Materie. Das innere Wesen des Stoffes ist uns unbekannt. Ueber seine innere Bildung aber sind Rückschlüsse aus seinen Eigenschaften möglich. Es ist bekannt, daß der Stoff zerlegt und in immer kleinere Theilchen getheilt werden kann. Wäre der Stoff innerlich ungetheilt, innerlich zusammenhängend, wie er der oberflächlichen Betrachtung erscheint, so würden wir ihn ebenso wenig theilen können, als wir Stoff zu verwandeln, z. B. Gold aus Eisen zu bereiten, im Stande sind. Es muß demnach die Theilbarkeit des Stoffes uns beweisen, daß er innerlich getheilt ist. Diese innere Getheiltheit kann aber nicht bis ins Unendliche gehen, und ebenso wenig daher die physische Theilbarkeit*); denn sonst müßten die letzten Theilchen = 0 sein, während doch etwas Wirkliches nicht aus lauter Nullen bestehen kann. Es muß daher die innere Getheiltheit des Stoffes eine Grenze haben, es muß ungetheilte und daher untheilbare Theilchen im Stoffe geben. Man nennt diese Theilchen Atome (von α privativum und τέμνω = ich schneide).

Von den zahlreichen Methoden, die Existenz der Atome abzuleiten, möge noch folgende hier eine Stelle finden: Eine chemische Verbindung, z. B. Zinnober, besteht aus ganz bestimmten Mengen der Bestandtheile, hier Schwefel und Quecksilber, welche unzerstörbar und unverändert durch alle nur denkbaren chemischen Processe hindurchgehen und sich unverändert erhalten. Diese Eigenschaft der Erhaltung des Stoffes ist die Grundlage der Chemie. Eine chemische Verbindung zweier Elemente ist nur in der Weise denkbar, daß sich entweder die Stoffe gegenseitig durchdringen oder sich in Theilen an einander lagern. Bei der ersten Anschauung wäre es unmöglich, daß gleiche Mengen derselben Bestandtheile verschiedene Verbindungen liefern könnten. Nun gibt es aber zahlreiche Fälle isomerer Verbindungen, d. i. ganz verschiedener Körper, die aus gleichen Mengen gleicher Bestandtheile zusammengesetzt sind. Die Chemiker führen aus der organischen Chemie sogar fünf Körper von verschiedenen Eigenschaften auf, die aus ganz gleichen Mengen derselben Elemente bestehen. Da sich nun gleiche Mengen von denselben zwei Stoffen unmöglich in verschiedener Weise durchdringen können, so bleibt nur die Annahme übrig, daß in den chemischen Verbindungen die Theile eines Körpers neben die Theile eines anderen gelagert sind, daß also z. B. im Zinnober Schwefel- und Quecksilbertheile durch enges Zusammenlagern Zinnobertheile bilden. Wenn nun Zinnober getheilt wird, so erhält man immer wieder Zinnober; da man aber bei immer weiter gehender Theilung endlich an ein Zinnobertheilchen kommt, das nur aus Schwefel- und Quecksilbertheilchen besteht, so müssen bei der letzten Theilung Schwefel- und Quecksilbertheilchen zum Vorschein kommen. Und diese Theilchen, die in der Wirklichkeit der Körperwelt nicht weiter getheilt sind, nennen wir Atome. Wären sie noch weiter theilbar, so würde der chemische Proceß der Verbindung, der ja schon eine bis zu unendlicher Feinheit herabgehende Theilung vollbracht hat, auch noch die weitere Theilung vorgenommen haben. Wir dürfen daher sagen, die Atome sind die kleinsten ungetheilten und daher untheilbaren Theilchen.

Nach allgemeiner Annahme sind die Atome nicht isolirt, nicht gleichmäßig in einem Körper vertheilt, sondern es sind immer zwei oder mehrere enger beisammen als bei den übrigen, vielleicht unmittelbar an einander gelagert. Solche Atomgruppen nennt man Moleküle. Diese Gruppirung findet sich nicht blos in den chemischen Verbindungen, sondern auch in den chemischen Elementen, wie gewichtige chemische und physikalische Thatsachen anzunehmen gebieten. Das Molekül eines Elementes besteht aus lauter gleichen Atomen, das Molekül einer Verbindung aus verschiedenen Atomen; so besteht das Wasserstoff-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff, das Wasser-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff, das Zuckermolekül aus 12 At. Kohlenstoff, 22 At. Wasserstoff und 11 At. Sauerstoff. Wie die verschiedene Gruppirung der Atome die Verschiedenheit von

*) Die mathematische, d. i. die gedachte Theilbarkeit hat nur mit unsern Gedanken eine Grenze.

isomeren Stoffen, d. i. aus gleichen Mengen derselben Elemente zusammengesetzten Stoffen begreiflich macht, so kann auch die verschiedene Zahl von Atomen in dem Molekül eines Elementes die Thatsache verständlich machen, daß ein und dasselbe Element mit verschiedenen Eigenschaften ausgestattet vorkommt, z. B. Kohlenstoff als Kohle, Graphit und Diamant, Sauerstoff als Ozon; gelber, rother und schwarzer Phosphor.

Da die Atome und Moleküle der meisten Körper an einander haften, so muß man annehmen, daß sie mit Anziehung begabt sind, daß sie einander festhalten, wie die Erde einen Körper festhält. Weil man außerdem zu der Annahme genöthigt ist, daß die Moleküle im Verhältnisse zu ihrer Größe weit von einander entfernt sind, so ist man zu der Meinung gelangt, daß sich zwischen den Körpermolekülen ein höchst feiner Stoff ausbreite, dessen Atome einander abstoßen. Dieser Stoff, dessen Atome man sich noch viel kleiner als die Körperatome denkt, wird Aether genannt. Er ist unsichtbar und unmerkbar durch alle Körper und den ganzen Weltraum verbreitet und der Träger der Licht- und Wärmestrahlen.*) Da die kleinsten Mengen der Elemente in freien Zustande die Moleküle sind, und da die Anziehung der viel größeren Körpermoleküle auch viel größer sein muß als die Abstoßung der Aetheratome, ähnlich wie die Anziehung der Erde größer ist als die Schwungkraft der irdischen Körper, so muß sich um jedes Körpermolekül eine Hülle viel dichteren Aethers ansammeln; die chemische Verbindung wäre hiernach das Zusammentreten mehrerer Atome verschiedener Elemente in eine Aetherhülle.

Die äußeren Eigenschaften der Atome sind uns im Ganzen noch ein Geheimniß; doch fallen die Schranken des Geheimnisses täglich mehr vor den vereinigten Forschungen der modernen Physik und Chemie. Schon längere Zeit wußte man bezüglich der Atomgewichte, daß Wasserstoff das leichteste aller Atome besitzt, und wieviel mal schwerer die Atome der anderen Elemente sind als das Wasserstoffatom; so ist das Atomgewicht des Sauerstoffs 16, das des Schwefels = 32; diese Atomgewichte sind nicht die Gewichte der kleinsten frei existirenden Mengen der Elemente, weil diese ja als Moleküle auftreten. Die meisten Molekulargewichte sind doppelt so groß als die Atomgewichte; so ist das von Wasserstoff = 2, von Sauerstoff = 32, von Schwefel = 64. Wenn wirklich das Phosphormolekül aus 4 Atomen besteht, so ist das Molekulargewicht 4 . 31 = 124; und beim Quecksilber, einem Element, das in Atome aufgelöst sein soll, würden Atomgewicht und Molekulargewicht einander gleich sein = 200. Auch die Größe der Atome ist nicht mehr ganz verschlossen; W. Thomson (1870) berechnete, daß der Durchmesser der Gasmoleküle nicht kleiner als 2 Tausendmilliontel eines Centimeters sein kann. Eine Ahnung von dieser Kleinheit erhält man, wenn man sich einen Wassertropfen bis zur Größe der Erde angeschwollen denkt und sich vorstellt, daß

---

*) Nach dem Wunsche von Collegen mögen hier einige Gründe für das Dasein des Aethers folgen, die wir als dem Schüler noch weniger verständlich in eine Anmerkung verweisen und ihre nähere Ausführung dem Lehrer überlassen: 1) Licht und Wärme strahlen unaufhörlich von allen Sonnen aus und können nur Stoff oder Bewegung sein; sind sie Stoff, so hat derselbe längst alle Zwischenräume der Weltkörper erfüllt, sind sie Bewegung, so muß ein Substrat der Bewegung vorhanden sein, ein Stoff, der sich bewegt, und dieser Stoff muß überall vorhanden sein, was nur bei einer Abstoßung seiner Theilchen denkbar ist. 2) Nach der dynamischen Gastheorie (§ 54) müssen die Gasmoleküle absolut elastisch sein; wollte man nun den Körperatomen selbst diese Eigenschaft zuschreiben, so wäre die Anziehung, die Bildung chemischer Verbindungen nicht denkbar; verlegt man aber die Abstoßung und Elasticität in die Aetherhülle, so schwindet diese Schwierigkeit, wenn auch nicht jede. 3) Bekanntlich bestehen die Sonnenstrahlen aus 60 bis 1000 Billionen Schwingungen; wollte man nun, wie die Gegner des Aethers thun müssen, die Fortpflanzung des Lichtes durch Glas u. s. w. den Glasmolekülen selbst zuschreiben, so würden dieselben ebenfalls jene Schwingungen vollziehen müssen, also in der höchsten Weißgluth sein. 4) Wäre der Weltraum absolut leer, so dürfte kein Weltkörper eine Verminderung seiner fortschreitenden Bewegungskraft erleiden; da nun eine solche bei dem Encke'schen Kometen nachgewiesen ist, indem die Umlaufzeit in den 19 Wiederkehren seit seiner Entdeckung schon um 2 Tage abgenommen hat, so ist an dem Vorhandensein eines allerfüllenden Mediums nicht zu zweifeln und ist dessen Allerfüllung nur mit den Eigenschaften des Aethers begreiflich. 5) Die Extinction des Fixsternlichtes, Lamont Astronomie 113.

dann nach Thomson die mitgewachsenen Wassermoleküle etwa die Größe von Flintenkugeln erreicht hätten. Loschmidt (1871) gibt die Durchmesser der Moleküle von Wasserstoff zu 4, von Sauerstoff zu 7, von Stickstoff zu 8 Hundertmilliontel eines Centimeters an. Nach Thomson finden sich in 1ccm Gas nicht mehr als 60000 Billionen Moleküle, in 1ccm eines flüssigen oder festen Körpers zwischen 3 und 100 Quadrillionen Moleküle. Die Abstände der Gasmoleküle betragen nach Clausius etwa 1 Zehntausendtel Millimeter und die Abstände der Moleküle flüssiger und fester Körper 1 bis 2 Tausendmilliontel Centimeter. Der Halbmesser der Wirkungssphäre der Anziehung eines Moleküls, d. i. die Entfernung, innerhalb welcher ein Molekül auf ein anderes noch wirken kann, liegt nach Mousson und Quincke zwischen 6 und 8 Hunderttausendtel eines Millimeters, ist also 5 bis 10 mal kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Alle diese Zahlen gewinnen dadurch sehr an Wahrscheinlichkeit, daß sie von verschiedenen Forschern nach verschiedenen Methoden gewonnen und nicht wesentlich verschieden groß gefunden wurden. Natürlich haben sie alle etwas Hypothetisches, da die ganze Atomtheorie nur eine Hypothese ist, der indeß die meisten Naturforscher mit wenigen Ausnahmen (der Mineraloge Weiß und seine Schüler) huldigen. Die Philosophen sind der Atomtheorie meist entgegen und halten den Stoff für ungetheilt. (Dynamistische Anschauung im Gegensatze zu der atomistischen.)

Das Vorhandensein der Molekularkräfte, d. i. der Anziehung und Abstoßung*) in den Molekülen, ergibt sich aus einfachen Versuchen. Zieht man einen beliebigen Körper aus einander, jedoch nicht über gewisse Grenzen, so kehrt er nach Beseitigung der Einwirkung wieder in seine vorige Gestalt zurück; also ziehen seine Theile einander an. Preßt man den Körper innerhalb gewisser Grenzen zusammen, so dehnt er sich nachher wieder aus; also stoßen seine Theile einander ab.

Anziehung und Abstoßung sind im ungeänderten Zustande gleich groß oder im Gleichgewichte; denn wäre die Anziehung überwiegend, so müßten die Theilchen sich mehr einander nähern, wäre aber die Abstoßung überwiegend, so müßten sie sich mehr von einander entfernen; wenn also der Körper ungeändert bleibt, so sind Anziehung und Abstoßung im Gleichgewichte. Nach der Größe der beiden Kräfte, welche von der Lage der Theilchen gegen einander und von ihren Wärmezuständen abhängt, unterscheidet man feste, flüssige und luftförmige Körper, also drei Aggregatzustände. Ein fester Körper ist bekanntlich ein solcher, welcher der Trennung seiner Theile einen großen Widerstand entgegensetzt. Ein flüssiger Körper ist ein solcher, welcher der Trennung seiner Theile nur einen äußerst kleinen Widerstand entgegensetzt. Ein luftförmiger Körper ist ein solcher, dessen Theile sich von selbst von einander trennen, wenn sie nicht durch einen äußeren Widerstand zusammengehalten werden. Dies zeigt uns deutlich ein Veilchenstrauß, der, in ein Zimmer gebracht, bald den ganzen Raum mit seinem Duft erfüllt; die Dufttheilchen breiten sich also in dem Raume von selbst aus. In den luftförmigen Körpern ist demnach kein Gleichgewicht mehr zwischen Anziehung und Abstoßung, sondern die Abstoßung ist offenbar größer, wird aber durch den äußeren Widerstand im Gleichgewicht gehalten. In den festen Körpern sind Anziehung und Abstoßung sehr groß, weil in diesen die Moleküle am nächsten beisammen sind, und weil jede Naturkraft ihre Wirkung in der größten Nähe am stärksten entfaltet. Wenn nun nach dem Zusammenpressen die Moleküle sich stärker abstoßen als anziehen, während vorher Anziehung und Abstoßung gleich groß waren, so ist dies nur dadurch erklärlich, daß bei abnehmender Entfernung der Moleküle die Abstoßung stärker wächst als die Anziehung; dies Gesetz scheint auch dadurch angezeigt, daß die Abstoßung von den kleineren Aetheratomen, die Anziehung aber von den größeren Körpermolekülen herrührt. Ist dieses Gesetz richtig, so muß bei wachsender Entfernung die Abstoßung stärker abnehmen als die Anziehung, was durch den Versuch mit einem ausgedehnten Körper bestätigt wird, der nach der Ausdehnung sich von selbst wieder zusammenzieht. In den flüssigen Körpern sind Anziehung und Abstoßung beide sehr klein, weil die Theilchen weit von einander entfernt sind; beim Zusammendrücken wächst nach unserem Gesetze die Abstoßung wieder stark, daher dehnt sich auch jede comprimirte Flüssigkeit wieder aus. Wird aber ein Flüssigkeitstheilchen von der übrigen Masse entfernt, so wird die ohnedies sehr geringe Anziehung gleich Null, die Abstoßung wird durch den Stoß der trennenden Einwirkung unterstützt, weshalb sich das Theilchen von der Masse trennt. Jedoch muß bei dem Uebergange von dem festen zu

*) Es ist nicht nöthig, die Worte Anziehung und Abstoßung, die offenbar nur eine Uebertragung unseres Kraftgefühls auf die Atome sind, wörtlich zu nehmen und so die Atome mit geheimnißvollen immateriellen Eigenschaften auszustatten. Die Abstoßung des Aethers mag nur eine Wirkung seiner ihm immanenten Bewegung sein und die Anziehung eine Stoßwirkung des bewegten Weltäthers. Wir bedienen uns jener Ausdrücke nur so lange, als der tiefere Sachverhalt noch unbekannt ist.

dem flüssigen Zustande noch eine Abstoßung außer der des Aethers einwirken, deren Nothwendigkeit beim Uebergange in den Gaszustand noch deutlicher hervortritt. Wird nämlich ein Schoppen Wasser in Dampf verwandelt, so nimmt der Dampf einen mehr als tausendfach größeren Raum ein; demnach haben sich die Moleküle viel weiter von einander entfernt als im flüssigen Körper; es müßte demnach die Abstoßung nach unserem Gesetze viel kleiner sein als die Anziehung. Nun ist aber in den Gasen die Abstoßung größer als die Anziehung; folglich muß zu der molekularen Abstoßung noch eine andere Abstoßung beigetreten sein. Da wir die den Aetheratomen zugehörige oder den Molekülen immanente Abstoßung schon in Anspruch genommen haben, so kann diese neue Abstoßung nur in einer Bewegung der Moleküle liegen; denn ein sich bewegendes Molekül entfernt sich von der übrigen Masse, verhält sich also ebenso, als ob es stärker abgestoßen würde. Demnach muß bei dem Uebergange in den Gaszustand, und ebenso bei der Verwandlung eines festen in einen flüssigen Körper den Molekülen Bewegung mitgetheilt werden. Da nun diese Verwandlung nur durch Mittheilung von Wärme stattfindet, so liegt die Folgerung nahe, Mittheilung von Wärme und Mittheilung von Molekularbewegung seien eins und dasselbe; wir erhalten hierdurch eine Andeutung, daß Wärme nichts anderes ist als Molekularbewegung, sind aber durch diese Betrachtung auch auf den wesentlichen Einfluß hingewiesen, den diese Bewegung auf die Aggregatzustände ausübt.

Nach den Thatsachen der neueren Physik sind nämlich die Moleküle und Atome der Körper nicht in Ruhe, sondern in unaufhörlicher, unendlich feiner Bewegung. Diese *Molekularbewegung* ist so fein, daß selbst die geschärftesten Sinne dieselbe nicht wahrnehmen können. Nur in Flüssigkeiten hat man eine directe bewegende Folge derselben mittels des Mikroskopes wahrgenommen. Schon Brown hatte 1827 feine in Flüssigkeit schwebende Theilchen hin und her zittern sehen (Brown'sche Molekularbewegung); Wiener hat 1863 die Versuche in der Weise angestellt, daß jeder andere Einfluß außer der Flüssigkeit abgeschlossen war, und die Bewegung bis zum Eintrocknen der Wasserschicht, 12 Tage lang, verfolgt und unverändert gefunden, und Exner hat 1867 gezeigt, daß diese zitternde Bewegung mit der Temperatur steigt, so sehr, daß schwere Zinnobertheilchen dadurch vom Sinken bewahrt bleiben. Wie die Moleküle der Flüssigkeiten, so sind auch die aller anderen Körper in den lebhaftesten und feinsten Bewegungen begriffen; selbst der zäheste Stahl, der härteste Diamant besteht aus ewig hin- und herzitternden Theilchen. Diese feinen Bewegungen bilden die Wärme und erzeugen das Licht; je lebhafter sie sind, desto höher ist die Erhitzung der Körper. Sie bedingen außerdem den Unterschied der drei *Aggregatzustände*, des festen, flüssigen und luftförmigen Zustandes der Körper.

Die Moleküle eines *festen* Körpers können nur schwingende Bewegungen um ihre Gleichgewichtslage vollziehen; denn geht ein Molekül aus dieser Lage, in welcher Anziehung und Abstoßung groß und gleich groß sind, heraus, so wird nach unserem Gesetze die Anziehung sofort größer als die Abstoßung und führt dasselbe in jene Lage mit zunehmender Geschwindigkeit zurück. In dieser angelangt, kann es nach dem Gesetze der Trägheit nicht zur Ruhe kommen, es geht über diese Lage hinaus, um dort sogleich wieder die eben geschilderte Wirkung zu erfahren; folglich schwingt das Molekül unaufhörlich hin und her; die Moleküle der festen Körper sind also in einer unveränderlichen, *stabilen Gleichgewichtslage*, die sie zwar fortwährend verlassen, aber auch immer wieder einnehmen. Ist jedoch die Entfernung der Moleküle von einander so groß geworden, daß ihre Anziehung und die vom Aether herrührende gleiche Abstoßung sehr gering sind, so nimmt zwar nach einem Verlassen dieser Gleichgewichtslage die Anziehung ebenfalls weniger ab als die Abstoßung; die Anziehung war jedoch in der Gleichgewichtslage schon gering, muß daher jetzt noch geringer sein; die vom Aether herrührende Abstoßung wird etwas kleiner sein als diese Anziehung, so daß trotz der Kleinheit letzterer das Molekül umkehren müßte. Hat dasselbe aber durch erhöhte Wärme eine stärkere Molekularbewegung erhalten, so kann es durch den Schwung dieser Bewegung die Anziehung überwinden und wird dann nicht in die Gleichgewichtslage zurückkehren, sondern so weit fortschreiten, bis es gegen andere Moleküle trifft, die es dann festhalten, bis es entweder durch den Stoß der Nachbarmoleküle, oder durch erhöhte Wärme oder einen äußeren Stoß dieselbe wieder verläßt. Ein solches Molekül ist nach dieser Betrachtung sehr leicht ver-

schiebbar, es bildet mit Molekülen gleichen Zustandes einen flüssigen Körper. Die Moleküle flüssiger Körper befinden sich also in leicht veränderlicher, labiler Gleichgewichtslage, um welche sie zwar hin- und herschwingen, dieselbe aber häufig verlassen, um zu anderen Molekülen fortzuschreiten. Sind nun die Moleküle eines Körpers noch weiter von einander entfernt, ist also ihre Anziehung verschwindend klein, und ist ihre molekulare Bewegung so stark, daß der Schwung derselben die Anziehung überwiegt, so wird jedes Molekül in gerader Linie fortschreiten, bis es gegen eine feste Wand oder ein anderes Molekül fliegt. Im Momente des Zusammenstoßes wird der Aether so stark verdichtet, daß er das Molekül mit derselben Geschwindigkeit zurückwirft, wonach dasselbe seine geradlinig fortschreitende Bewegung meistens in anderer Richtung fortsetzt. In diesem Falle werden die Moleküle, da sie alle nur denkbaren Richtungen haben können, nach allen Dimensionen aus einander fliegen und nur durch die Festigkeit einer Grenzwand vor der Zerstreuung geschützt werden; sie machen den Eindruck, als ob die molekulare Abstoßung in ihnen ausschließlich wirksam wäre. Solche Moleküle aber bilden einen luftartigen Körper, ein Gas, einen Dampf. Man darf sich indessen nicht vorstellen, daß die Moleküle in den drei Zuständen ausschließlich die geschilderten Bewegungen innehaben. In den 2 letzten Fällen ist nicht immer vorauszusetzen, daß die auf einander schlagenden Moleküle sich immer in der Mitte treffen; sie können auch seitlich auf einander stoßen, und müssen dann auch in drehende Bewegung um eine Achse gerathen. Ebenso ist auch nicht anzunehmen, daß die Atome im Innern des Moleküls von den Stößen unberührt bleiben; vielmehr liegt die Vermuthung sehr nahe, daß die Atome eines Moleküls gegen einander in Bewegungen verschiedener Art gerathen möchten; endlich könnte auch der Aether, welcher das Molekül umschließt, mannigfache Bewegungen annehmen. Die geschilderten Bewegungen sind jedoch die wesentlichsten und bedingen die Aggregatzustände; sie mögen daher kurz zusammengefaßt werden:

Die Moleküle fester Körper vollbringen schwingende Bewegungen um stabile Gleichgewichtslagen; die Moleküle der Flüssigkeiten führen ebenfalls schwingende Bewegungen, aber um labile Gleichgewichtslagen, aus, die häufig in fortschreitende Bewegungen übergehen; die Zahl der Schwingungen geht, wie später erhellen wird, von 60 bis 1000 Billionen in einer Secunde. Die Moleküle der Luftarten besitzen fortschreitende Bewegungen, deren Geschwindigkeit bis über 1800^m in einer Secunde hinausgeht (Clausius 1856).

19 **Masse. Dichte oder Dichtigkeit. Specifisches Gewicht.** Unter der Masse eines Körpers verstehen wir die Menge des Stoffes in dem Körper. Um die Masse zu messen, muß man sie mit einer andern, als Einheit aufgestellten Masse vergleichen. Als Einheit der Masse ist diejenige Masse gewählt worden, welche der Einheit der Kraft bedarf, um in der Einheit der Zeit die Einheit der Geschwindigkeit zu erreichen. Unter dieser Voraussetzung ist die Masse eines Körpers gleich dem Quotienten seines Gewichtes durch die Acceleration der Erdschwere, d. h. ein Körper enthält so viele Massen-Einheiten, als die Acceleration g in seinem Gewichte p enthalten ist oder

$$m = p/g \qquad (6)$$

Zwei Körper von demselben Stoffe haben gleiche Massen, wenn sie gleich viele Atome des Stoffes enthalten; wären alle Körper von gleichem Stoffe, so würde demnach die Masse einfach nach der Zahl der Atome zu messen sein. Da aber verschiedene Stoffatome eine verschiedene Masse haben können, und da außerdem die Zahl der Atome nicht auffindbar ist, so kann hierdurch die Masse nicht gemessen werden. Ebensowenig ist dies möglich durch das Gewicht; denn das Gewicht eines Körpers ist an verschiedenen Stellen der Erde ver-

schieden, würde auf der Sonne 27 mal so groß und auf dem Monde 6 mal so klein sein als hier, während doch die Menge des Stoffes, die Masse, überall dieselbe bleibt. Ein Maß für die Masse kann nur in dem eigentlich Massigen, Stofflichen des Stoffes gesucht werden. Wir hörten schon, daß jedes Atom die Eigenschaft hat, auf andere Atome bewegend, anziehend einzuwirken. Diese active Eigenschaft des Stoffes kann aber unmöglich die Stoffnatur ausmachen, da auch Stoff ohne die active Eigenschaft denkbar ist. Gerade das Gegentheil, die passive Eigenschaft der Trägheit macht das Stoffliche des Stoffes aus, die Eigenschaft, daß ein Atom nicht auf sich selbst wirken, daß ein Körper nichts an sich selbst verändern kann, daß er einer äußeren Einwirkung, einer Kraft bedarf, um bewegt zu werden. Demnach ist die Masse gleich der Menge desjenigen, das einer Kraft bedarf, um eine gewisse Geschwindigkeit zu erlangen, oder wie Redtenbacher sich ausdrückt, die Masse ist die Menge des Trägen.

Als Einheit der Masse muß daher diejenige Masse angenommen werden, welche der Einheit der Kraft bedarf, um in einer Secunde die Einheit der Geschwindigkeit zu erhalten. Dieser Begriff der Massen-Einheit macht uns die Entwickelung einiger wichtigen Sätze möglich. Um nämlich einer 2ten, 3ten u. s. w. Massen-Einheit dieselbe Geschwindigkeit zu ertheilen, ist noch eine 2te, 3te u. s. w. Kraft-Einheit nöthig; *es verhalten sich folglich die bewegenden Kräfte bei gleichen Geschwindigkeiten wie die bewegten Massen.* Ebenso ist eine 2te, 3te u. s. w. Kraft-Einheit nöthig, um derselben Masse eine 2te, 3te u. s. w. Einheit der Geschwindigkeit zu ertheilen; *es verhalten sich also bei gleichen Massen die bewegenden Kräfte wie die erzeugten Geschwindigkeiten.* Nach dem ersten Satze ist für eine 5 mal so große Masse eine 5 mal so große Kraft nöthig, um dieselbe Geschwindigkeit hervorzurufen; ist aber die Kraft nicht 5 mal so groß geworden, sondern dieselbe geblieben, so muß nach dem zweiten Satze die Geschwindigkeit der 5 mal so großen Masse 5 mal so klein werden; *folglich verhalten sich bei gleichen Kräften die erzeugten Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Massen.*

Mittels dieser Sätze ist es möglich, aufzufinden, wie viele der oben festgestellten Massen-Einheiten eine Masse m enthält, wenn uns ein Beispiel zu Gebote steht, daß diese Masse durch irgend eine Kraft in irgend einer Zeit eine bestimmte Geschwindigkeit erhält. Ein solches Beispiel bietet der freie Fall; denn hierbei erlangt jede Masse m in 1 Secunde die Geschwindigkeit $g = 10^m$; die Kraft, welche diese Geschwindigkeit erzeugt, ist die Anziehung zwischen der Erde und der Masse m. Wenn aber zwei Massen einander anziehen, d. i. einen Trieb haben, sich einander zu nähern, so kann man die Größe dieses Triebes, also auch der Anziehung finden, wenn man zwischen die beiden Massen einen Körper z. B. ein Brett befestigt, das an die erste Masse angelehnt ist, und dann die Größe des Druckes aufsucht, den dieses Brett von der ersten Masse erleidet; dieser Druck gibt offenbar die Größe der Anziehung an. So übt auch jeder Körper auf der Erde einen Druck auf seine Unterlage aus, weil er von der Erde angezogen wird, und dieser Druck, bekanntlich Gewicht genannt, gibt die Anziehung der Erde an; die Anziehung der Erde gegen die Masse m ist also das Gewicht p dieser Masse, und durch diese Kraft erlangt die Masse in einer Secunde die Geschwindigkeit g. Wenn nun diejenige Masse, die der Kraft 1 bedarf, um die Geschwindigkeit 1 zu erlangen, = 1 gesetzt wird, so wäre die Masse, die der p-fachen Kraft p bedürfte, um dieselbe Geschwindigkeit 1 zu erlangen, auch p mal so groß, also = p, weil bei gleichen Geschwindigkeiten die Kräfte sich wie die Massen, oder die Massen sich wie die Kräfte verhalten. Unsere Masse m erhält jedoch durch die Kraft p nicht die Geschwindigkeit 1, sondern die Geschwindigkeit g. Wenn aber eine Masse nicht die Geschwindigkeit 1 durch eine gewisse Kraft erhält, sondern die g-fache Geschwindigkeit g, so kann dies nur davon herrühren, daß diese Masse kleiner ist, und zwar muß sie nach dem dritten Satze in demselben Verhältnisse kleiner sein als die Geschwindigkeit größer ist; folglich ist unsere Masse

$$m = p / g \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

welche Beziehung auch oft unter der Form $p = m . g$ benutzt wird.

Die Masse eines Körpers ist also der Quotient seines Gewichtes p durch die Acceleration g des Weltkörpers, auf welchem sich der Körper befindet. Auf der Erde ist g ungefähr $= 10^m$; also ist die Masse eines Körpers gleich dem 10ten Theile seines Gewichtes auf der Erde.

Ist $p = 10^{km}$, so ist $m = 10/10 = 1$, d. h. die Massen-Einheit besitzt ein Körper, der auf der Erde 10 Kilogramm wiegt.

Dieses Maß der Masse entspricht der Thatsache, daß die Masse sich nicht ändert, wenn ein Körper auf einen andern Weltkörper gebracht würde, da in solchem Falle p und g sich in gleichem Verhältnisse ändern, also den Werth des Bruches p / g unverändert lassen; so wird auf der Sonne das Gewicht = 27 p, aber die Acceleration nimmt in demselben Verhältnisse zu, ist also 27 g, wodurch der Quotient beider, die Masse m, wieder = p / g wird. Ebenso ist in verschiedenen geographischen Breiten das Gewicht eines und desselben Körpers verschieden; allein gerade so, wie sich das Gewicht ändert, ändert sich auch die Acceleration; demnach bleibt der Werth des Bruches p / g, die Masse, immer gleich groß. Es genügt also das aufgestellte Maß für die Masse der Anforderung, daß die Masse bei einer Veränderung des Gewichtes constant bleibt. An einem und demselben Orte ist g für alle Körper von gleicher Größe; folglich verhalten sich an einem und demselben Orte die Massen wie die Gewichte; es können demnach die Massen verschiedener Körper an demselben Orte der Erde durch die Gewichte verglichen werden.

Betrachtet man die Masse im Verhältnisse zu dem von ihr eingenommenen Volumen, so führt dies zu dem Begriffe der Dichtigkeit; denn ein Körper ist um so dichter, je mehr Masse er in demselben Volumen enthält. Nahe verwandt mit dem Begriffe der Dichtigkeit ist der des specifischen Gewichtes, da in diesem Begriffe das Gewicht eines Körpers im Verhältnisse zu seinem Volumen betrachtet wird; man sagt, ein Körper ist specifisch schwerer oder hat ein größeres specifisches Gewicht als ein anderer, wenn er in demselben Volumen mehr Gewicht enthält als dieser. Da diese Begriffe häufig verwechselt werden, so wollen wir sie hier nur scharf neben einander stellen, während die Bestimmung des specifischen Gewichtes und der Dichte erst später erfolgen kann:

1. Unter der Dichte oder Dichtigkeit eines Körpers versteht man die Masse der Volumeinheit desselben (specifische Masse).

2. Unter dem specifischen Gewichte eines Körpers versteht man das Gewicht der Volumeinheit desselben.

3. Die Volumeinheit und die Gewichteinheit werden bei festen und tropfbar flüssigen Körpern immer so gewählt, daß das Gewicht der Volumeinheit Wasser oder das specifische Gewicht des Wassers = 1 ist.

4. Weil das Gewicht der Volumeinheit Wasser = 1 gesetzt wird, so gibt das spec. Gew. eines festen oder flüssigen Körpers auch an, wieviel mal so schwer ein beliebiges Volumen des Körpers ist als ein gleiches Volumen Wasser.

5. Da das specifische Gewicht das Gewicht und die Dichte die Masse der Volumeinheit angibt, so besteht zwischen der Dichtigkeit d eines Körpers und seinem spec. Gew. s dieselbe Relation, wie zwischen der Masse und dem Gewichte. Die Beziehungen zwischen Masse und Gewicht sind nach Fl. (6)

$$1)\ m = p / g; \quad 2)\ p = m . g; \quad 3)\ g = p / m$$

Die Beziehungen zwischen Dichte und spec. Gew. sind analog:

$$1)\ d = s / g; \quad 2)\ s = d . g; \quad 3)\ g = s / d$$

Die Dichte ist also nicht gleich dem spec. Gew., sondern gleich dem spec. Gew. dividirt durch die Acceleration g. An einem und demselben Orte der Erde aber ändert sich die Acceleration nicht; daher ist die Dichte eines anderen Körpers $d' = s'/g$; dividirt man die letzte Gleichung durch die zweite Gleichung 1), so erhält man die Proportion $d' : d = s' : s$; die Dichten zweier Körper verhalten sich wie ihre specifischen Gewichte; Eisen ist ebenso vielmal dichter als Wasser, als es schwerer ist als Wasser. Hierdurch entsteht die häufige Verwechselung von Dichte und specifischem Gewichte.

Aufg. 14. Wie groß ist die Masse eines Körpers von 93^{kg} Gewicht? Aufl. $m = 93 / 10 = 9{,}3$; wie groß ist die Masse desselben Körpers auf der Sonne? Aufl. $m = 93 . 27 / 10 . 27 = 9{,}3$. — Aufg. 15. Welches Gewicht hat ein Körper auf der Sonne, dessen Masse = 6 ist? Aufl. Nach Fl. (6) ist $p = 1620^{kg}$. — Aufg. 16. Auf dem Monde wiegt ein Körper, dessen Masse = 6 ist, nur 10^{kg}; wie groß ist dort die Acceleration g? Aufl. Nach Fl. (6) ist $g = 1{,}66 \ldots .^{m}$.

5. Die Kraft.

20 **1. Begriff, Wesen und Wirkungsweise der Kraft.** Unter Kraft verstehen wir die Ursache jeder Veränderung. Da nach neueren Forschungen jede Veränderung in Bewegungsänderungen ihren Grund hat, so ist folgende Definition schärfer: Kraft ist die Ursache der Geschwindigkeitsänderung. Wenn man bei der Definition auf die Herkunft der Kraft sehen will, so muß beachtet werden, daß nach dem Gesetze der Trägheit kein Körper von selbst seinen Zustand ändern kann, und nur dann eine Veränderung zeigt, wenn auf ihn ein anderer Körper einwirkt. Von diesem Standpunkte aus ist Kraft die verändernde Einwirkung eines Körpers auf einen anderen. Wir beobachten nun oft, daß ein Körper auf einen anderen verändernd einwirken kann, wenn er als Ganzes oder in seinen Theilchen in Bewegung ist, daß also seine Kraft in seiner Bewegung liegt; nähere Forschungen ergaben, daß viele Kräfte ihren Grund in Bewegungen der Moleküle haben; überhaupt ist, was das Wesen der Kraft anlangt, die Wissenschaft auf gutem Wege, den Satz zu begründen: Kraft ist Bewegung. Mit der Durchführung dieses Satzes wird der Gedanke der Einheit der Kraft die Grundlage der Physik. — Jede bewegte Masse übt auf einen anderen Körper, den sie in Bewegung versetzt, einen Druck oder Zug aus; auch wenn wir Menschen einen Körper durch unsere Muskelkraft in Bewegung versetzen wollen, so müssen wir einen Druck oder Zug ausüben; wir setzen daher überall, wo wir eine Bewegung wahrnehmen, ebenfalls das Vorhandensein eines Druckes oder Zuges voraus. Aus diesem Grunde ist es seit alter Zeit gebräuchlich, den Druck oder Zug, der bei einer Bewegung auftritt, als die Ursache der Bewegung, als die Kraft zu bezeichnen. Indessen kann der Druck oder Zug für sich allein keine Bewegung bewirken; vielmehr muß der Körper, der den Druck oder Zug ausübt, in Bewegung sein, wenn eine Bewegung ausgeführt werden soll; die neuere Physik sagt daher, die Bewegung erzeugende Kraft ist nicht der todte Druck oder Zug, sondern Druck oder Zug verbunden mit Bewegung, sie ist Arbeit. Da indessen die Grundbegriffe der Mechanik am besten an Druck und Zug verstanden werden können, so sind in allen physikalischen und mechanischen Lehrbüchern Druck und Zug mit Kraft bezeichnet. In den Ausdrücken „Pferdekraft, lebendige Kraft, Spannkraft, Erhaltung der Kraft, Einheit der Kraft, Wärme ist eine Kraft, Licht ist eine Kraft u. s. w." bedeutet dagegen der Ausdruck Kraft eigentlich Arbeit, d. i. Druck oder Zug verbunden mit Bewegung, oder Massenbewegung. Diese doppelte Bedeutung des Ausdruckes Kraft ist ein nicht mehr zu beseitigender Mangel in der Wissenschaft, der den Studirenden zu besonderer Aufmerksamkeit veranlassen muß.

Wir sind aus dem alltäglichen Leben gewöhnt, den Ausdruck Kraft nur da anzuwenden, wo wir eine größere Masse in Bewegung versetzen sehen, während wir in der Physik in diesem Falle vorwiegend von mechanischer Kraft sprechen; da jedoch in der Größe einer Wirkung keine Ursache für eine verschiedene Bezeichnung liegen kann, so ist es folgerichtig, auch die Bewegungen kleinster Theilchen, die z. B. durch Schall und Licht vollbracht werden, als Kraftwirkungen zu bezeichnen; übrigens bewirken dieselben auch unter Umständen größere Massenbewegungen; eine kräftige Stimme vermag Gläser entzwei zu schreien, und das Licht bringt ein Gemenge von Chlor und Wasserstoff zur Explosion. Aber wenn wir auch nicht wüßten, daß Schall und Licht Bewegungen großer und kleinster Massen hervorbringen, so müßten wir sie dennoch Kräfte nennen; denn sie bringen doch offenbar Veränderungen hervor, wie das Licht die Körper erhellt und ihnen Farbe verleiht, wie der Schall in uns die Schallempfindung erweckt; also sind sie nach unserer ersten Definition als Kräfte zu bezeichnen; jede Wirkung muß eine Ursache haben (Causalitätsgesetz); und diese Ursache nennen wir eben Kraft.

In die schärfere Definition sind auch die Kräfte einbegriffen, die eine Richtungsänderung bewirken; denn eine solche findet statt, wenn einem bewegten Körper eine Geschwindigkeit nach einer neuen Richtung gegeben oder genommen wird.

In die schärfere Definition sind natürlich auch die Kräfte einbegriffen, die einen Körper aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung überführen; denn in ersterem Zustande hat der Körper die Geschw. 0, in letzterem hat er eine größere Geschw., also hat er eine Geschwindigkeitsänderung erfahren. Folgerichtig sind auch jene Ursachen Kräfte, welche eine Bewegung, wenn auch nur scheinbar zerstören, welche einen bewegten Körper zur Ruhe bringen. Wenn z. B. an einem Eisenbahnzuge der Dampfzufluß abgeschlossen und die Bremsen in Wirkung gesetzt werden, so gelangt der Zug durch die Reibung und den Widerstand der Luft allmälig zur Ruhe; also sind Reibung und Widerstand der Luft ebenfalls Kräfte. Wenn ein Stein gegen eine Mauer geschleudert wird, so kommt er zur Ruhe; die Wand enthält also eine Kraft, die wir Festigkeit nennen. Solche Kräfte, die eine Bewegung schwächen, hemmen oder aufheben, nennt man Widerstände oder Gegenkräfte.

Wenn nun eine Kraft im Stande ist, eine Bewegung, d. i. die Wirkung einer anderen Kraft aufzuheben, so liegt die Folgerung nahe, daß sie auch wohl eine andere Kraft aufzuheben im Stande sein dürfte, eine Folgerung, welche wir jeden Augenblick um uns und an uns bestätigt finden können, indem wir z. B. nur die zwei Hände mit gleicher Kraft gegen einander drücken. Demnach gibt es auch Kräfte, die keine Bewegung hervorbringen; diese Erscheinung ist nur dadurch erklärlich, daß die eine Kraft in jedem Zeittheilchen eine unendlich kleine Bewegung erzeugt, während die andere in derselben Zeit eine ebenso große aber entgegengesetzte Bewegung hervorbringt, wodurch der betreffende Körper immer wieder an seine Stelle versetzt, d. i. in Ruhe erhalten wird. Wenn nun die von beiden Kräften an demselben Körper hervorgebrachten Bewegungen gleich sind, so müssen auch die beiden Kräfte selbst gleich groß sein. Wir gelangen hierdurch zu einer Folgerung, welche in noch viel ausgedehnterem Sinne gilt, und welche Newton als das dritte Gesetz der Mechanik bezeichnet: „actio est par reactioni, jede Wirkung ist gleich der Gegenwirkung, jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft." Dieses Gesetz hat einen mehrfachen Sinn; zunächst spricht es die allgemeine Erfahrung aus, daß zur Ueberwindung einer Kraft, eines Widerstandes eine gleiche Gegenkraft verwendet werden muß. Wenn wir z. B. mittels einer Schnur ein an dieselbe befestigtes Gewicht von 10^{kg} vom Boden aufheben wollen, und nur eine schwache Zugkraft anwenden, so bleibt das Gewicht in Ruhe. Wir müssen durch Anstrengung der Muskeln unsere Zugkraft immer mehr steigern, bis sie die Größe von 10^{kg} erreicht hat; dann erst gelangt das Gewicht zur Bewegung; denn führen wir die Schnur über eine Rolle, so müssen wir mit derselben Kraft wie so eben ziehen, können aber auch unsere Muskelkraft durch ein zweites Gewicht von 10^{kg} ersetzen, und dann das erste leicht bewegen. Dieselbe Erfahrung machen wir, wenn eine Last auf wagrechtem Boden fortgeschoben werden soll; wir erfahren dann einen Widerstand, den wir Reibung nennen, und sind erst dann im Stande, die Last fortzuschieben, wenn unsere Druckkraft dem Widerstande der Reibung gleich geworden ist. — Das dritte Gesetz der Mechanik hat weiter den Sinn, daß die Aufhebung einer Kraft gewöhnlich dadurch geschieht, daß dieselbe in dem Körper, auf welchen sie wirkt, eine gleiche Gegenkraft erweckt. Liegt z. B. ein Gewicht auf dem Boden, so übt der Boden einen dem Gewichte gleichen Gegendruck aus; denn wäre dessen Gegendruck größer als das Gewicht, so würde er dasselbe in die Höhe schnellen, wie es z. B. eine zusammengedrückte Polsterfeder thun würde; wäre er kleiner, so würde das Gewicht sinken, wie z. B. auf morastigem Boden, auf weicher Butter; also muß der Gegendruck des Bodens dem Gewichte gleich sein. Dieser Gegendruck ist nicht schon vorher im Boden vorhanden, sondern wird durch das Gewicht erst hervorgerufen, indem dasselbe, wie schon betrachtet, die Moleküle einander nähert und dadurch deren Abstoßung vergrößert; hierdurch ist es erklärlich, daß ein und derselbe Boden durch seine Festigkeit den verschiedensten Gegendruck ausüben kann je nach der Größe des aufgelegten Gewichtes. Er verhält sich in dieser Beziehung ähnlich wie eine ausgestreckte Hand, auf welche immer mehr Gewichte gelegt werden und deren Gegendruck wir dann durch größere Anstrengung der Muskeln steigern, oder wie eine elastische Polsterfeder, die bei Vermehrung der aufgelegten Gewichte immer mehr zusammengedrückt wird und dann auch durch ihre Elasticität einen immer größeren Gegendruck ausübt, wie wir uns leicht überzeugen können, wenn wir das Zusammendrücken mit der Hand vornehmen. Ganz ähnliche Schlüsse gelten für eine Schnur, die ein Gewicht trägt; dieses übt auf die Schnur eine Zugkraft aus, die durch einen gleichen Gegenzug der Schnur aufgehoben wird; wäre dieser Gegenzug, diese Spannung größer als das Gewicht, so würde es in die Höhe gezogen werden; wäre er kleiner, so würde es sinken; wenn aber weder Heben noch Sinken stattfindet, so ist der Gegenzug dem Gewichte gleich. Die Schnur verhält sich wie ein Magnet, der eine Tragkraft von 100^{kg} hat, aber doch in dem Augenblicke, wo nur 1^{kg} an ihm hängt, nur eine Zugkraft von 1^{kg} ausübt, da er eben nur 1^{kg} trägt. Die Gleichheit von Druck und Gegendruck findet indeß nicht nur in der Ruhe, sondern auch in der Bewegung statt; man spürt den Gegendruck z. B. deutlich, wenn man einen Kahn mittels eines Ruders fortbewegt; in dem Maße, wie wir, um die

Bewegung zu beschleunigen, mit dem Ruder stärker gegen das Wasser drücken, fühlen wir auch den Gegendruck des Wassers zunehmen; wir fühlen, daß dieser Gegendruck verschwunden ist in dem Augenblicke, wo unser Druck aufhört. — Den Grundsatz, „Kraft ist gleich Gegenkraft", werden wir in der neueren Mechanik zu der höheren Bedeutung erweitert finden, die er schon in der lateinischen Fassung enthält, zu der Bedeutung, daß auch die Wirkung einer Kraft, ihre Arbeit, immer gleich der Wirkung oder Arbeit einer Gegenkraft ist. — Die der Action gleiche Reaction wird manchmal zur Erzeugung von Bewegungen benutzt, z. B. bei dem Losbrennen von Raketen; die nach unten ausströmenden Pulvergase üben eine solche starke Reaction aus, daß sie die Rakete zu ihrer bedeutenden Steighöhe treiben. Die Reaction des Schießpulvers spürt der Jäger als Kolbenstoß und beobachtet der Kanonier am Rückgange der eben losgeschossenen Kanone.

21 Für die Ansicht, alle Kraft sei Massenbewegung, aller Druck oder Zug entstehe durch Massenbewegung, spricht zunächst die Beobachtung, daß jede bewegte Masse, wenn sie auf andere Körper wirkt, Druck oder Zug ausübt und zwar auf jedem Punkte eines gewissen Weges. Jeder geschleuderte, geworfene, geschossene Körper übt einen Druck aus, wenn er auf andere Körper stößt; ein Wagenzug, in dessen Locomotive der Dampfeinschuß zu Ende ist, wirkt nur durch seine Bewegung, schleppt vermöge derselben sich selbst oder andere noch anhängende Lasten noch lange nach, übt also eine Zugkraft aus. Von solchen Beobachtungen ausgehend, ist es allerdings noch ein weiter Weg bis zu dem Ziele, alle Kräfte als Massenbewegungen zu erkennen. Nimmt man indessen mit der neueren Physik an, daß die Moleküle und Atome eines Körpers immer in Bewegung begriffen seien, so liegt das Begreifen aller Naturkräfte als Bewegungen schon näher. Die molekularen Bewegungen eines Körpers können sich auf die Moleküle eines anderen Körpers ganz oder theilweise übertragen, wenn die beiden Körper unmittelbar oder mittelbar durch einen Zwischenstoff mit einander verbunden sind, und können so die molekularen Bewegungen des anderen Körpers ändern. Daß für den Schall, das Licht, die Wärme, diese Anschauung richtig ist, unterliegt kaum mehr einem Zweifel; so erklärt sich z. B. die gewaltige Wirkung des Dampfes dadurch, daß die Moleküle desselben unaufhörlich mit großer Geschwindigkeit und in großer Zahl gegen die Grenzwände des Dampfraumes stoßen. Auch für den Magnetismus und die Elektricität ist jene Anschauung nicht unwahrscheinlich, wenn auch noch nicht durchgeführt. Nach dieser Anschauung wäre eine Kraftwirkung ohne Zwischenmedium, eine wahrhafte Fernewirkung, nicht denkbar; hierdurch wird uns abermals die Nothwendigkeit eines weltraumerfüllenden Mediums, des Aethers, nahe gelegt; denn die Anziehung der Weltkörper gegen einander wäre ohne den Aether eine Fernewirkung. Uebrigens sind wir gerade für diese wichtigste Kraft im Weltalle und im Innern jedes Körpers, für die Anziehung, am entferntesten von dem Ziele, dieselbe durch die Bewegung der Moleküle zu begreifen, obwohl schon Versuche vorliegen, sie durch den Stoß des bewegten Aethers zu erklären. Nur eine und zwar die räthselhafteste Anziehung, die chemische Verwandtschaft, ist, sogar ohne Benutzung des Aethers, an der Schwelle der Aufhellung angelangt; die Chemiker fassen dieselbe auf als eine Verdrängung von Atomen oder Molekülen durch solche andere Atome oder Moleküle, welche durch größere Masse oder größere Geschwindigkeit eine größere Stoßkraft besitzen; die Chemie wird hierdurch „der Kampf ums Dasein unter den Molekülen". — Auch aus dem dritten Grundsatze, „Wirkung ist gleich Gegenwirkung", läßt sich schließen, daß Kraft Bewegung sei; denn da die Wirkung einer Kraft Bewegung ist, so muß auch die Gegenwirkung, die ebenfalls eine Kraft ist, eine Bewegung sein.

Wenn nun Kraft gleich Massenbewegung ist, so ist offenbar das Wesentliche einer Kraft nicht der von derselben ausgeübte Druck oder Zug, sondern die Stärke der in ihr enthaltenen Bewegung. Bei manchen Naturkräften ist man auch so weit gekommen, die Größe einer Kraft durch die in ihr enthaltene Bewegungsstärke auszudrücken, wie z. B. bei der Wärme; außerdem ist bei manchen Kräften der in ihnen enthaltene Druck oder Zug nicht auffindbar oder er ist nach den Umständen höchst verschieden; so übt z. B. eine losgeschossene Kugel auf die Luft, die sie durchfliegt und die ihr nur einen geringen Widerstand entgegensetzt, nach dem dritten Gesetze einen geringen Gegendruck aus, auf Wasser nach demselben Grundsatze einen größeren, auf Holz oder Stein einen noch größeren. Es wäre demnach gewiß wünschenswerth, ebenso wünschenswerth wie die Einheit des Kraftbegriffs, alle Kräfte durch die Stärke der in ihnen vorhandenen Bewegung ausdrücken zu können; allein bei vielen Kräften kennt man noch nicht einmal die Art der in ihnen enthaltenen Bewegung, noch viel weniger aber die Stärke derselben; man weiß von ihnen vielmehr nur, daß sie sich als Druck oder Zug äußern, und kann meistens finden, wie groß derselbe ist. Zu dem Begriffe von Druck und Zug, von Abstoßung und Anziehung, sind wir offenbar dadurch gelangt, daß Menschen und Thiere durch ihre Muskelanstrengung nur ziehende und drückende Kräfte ausüben können; durch eine Zugkraft können wir uns einen Körper nähern, durch einen Druck können wir einen Körper von uns entfernen. Bemerken wir daher, daß

Körper oder Körpertheile sich einander nähern, so schreiben wir dies einer Zugkraft, oder einer Anziehung derselben gegen einander zu; finden wir, daß Körper oder Körpertheile sich von einander entfernen, so halten wir einen aus einander treibenden Druck, eine Abstoßung für den Grund dieser Erscheinung. Ein Stück Eisen nähert sich einem Magnet; ein nicht unterstützter Körper fällt zur Erde; bei der Abkühlung eines Körpers verkleinert sich der Raum desselben. Wir sprechen in diesen Fällen von Anziehung, von Zugkraft. Wird ein elektrischer Körper von einem leichten Körperchen berührt, so entfernt sich das letztere; eine zusammengedrückte Feder schnellt beim Aufhören des Druckes aus einander; eingeschlossener Dampf kann sein Gefäß sprengen. Dies sind Beispiele von Abstoßung, von Druck. Da man nun den von Kräften ausgeübten Druck oder Zug am deutlichsten wahrnimmt und leicht messen kann, so hat man früher den Druck und Zug für das Wesentliche an Kräften gehalten; außerdem lassen sich Druck und Zug als gerade Linien darstellen, welche von dem Sitze des Druckes oder Zuges nach den abgestoßenen oder angezogenen Körpern hinlaufen, also an Richtung und Größe ganz bestimmt sind, wodurch es möglich wird, sie in mathematische Behandlung zu ziehen. Weiter treten Druck und Zug sehr häufig für sich allein auf, ohne eine Bewegung hervorzubringen und ohne daß ihr Träger in Bewegung ist. Endlich müssen wir, wenn wir auch die Stärke der Bewegung in einer Kraft für das Wesentliche derselben halten müssen, doch zugestehen, daß jede Kraft einen Druck oder Zug ausübt. Aus allen diesen Gründen wurden Druck oder Zug gewöhnlich Kräfte genannt, es wurden Methoden, diese Kräfte zu messen, erdacht, und wurden die gefundenen Größen der mathematischen Betrachtung unterworfen. Man hielt es sogar für ein Hauptziel der Physik, alle Kräfte auf Druck und Zug, auf Abstoßung und Anziehung zurück zu führen, oder, da diese Kräfte von einem Körper aus in gerader Richtung auf jeden anderen Körper, wie von einem Centrum aus in den Richtungen der Radien wirken, auf Centralkräfte zu reduciren. Auch wir werden in den folgenden Abschnitten Druck und Zug Kräfte nennen und als solche in Betracht ziehen, und werden hierdurch die Mittel gewinnen, später das Wesentliche der Kräfte, ihre Bewegungsstärke auszudrücken.

22 **2. Messen der Kräfte.** Unter der Einheit der Kraft verstehen wir den Druck oder Zug, welcher nothwendig ist, um einer freien Masseneinheit in der Zeiteinheit die Einheit der Geschwindigkeit zu ertheilen; hiernach ist die Kraft k, welche im Stande ist, der Masse m in der Zeit t die Geschwindigkeit v zu ertheilen,

$$k = mv/t \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (7)$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Kraft k die ganze Zeit t hindurch unverändert wirkt, daß sie also eine constante Kraft ist; eine solche Kraft bringt aber eine gleichförmig beschleunigte Bewegung hervor, deren Acceleration $a = v/t$ nach Formel (2) ist; setzen wir diesen Werth in Formel (7) ein, so nimmt das Kräftemaß die Gestalt an

$$k = ma \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (8)$$

Wenn wir nun die Kraft messen wollen, welche durch die Anziehung der Erde die Masse m zum freien Falle bringt, derselben also die Acceleration g ertheilt, so müssen wir in der letzten Formel g statt a setzen; wir erhalten dann $k = mg$; da nun nach Formel (6) mg gleich dem Gewichte p des bewegten Körpers ist, so gilt hier das Kräftemaß

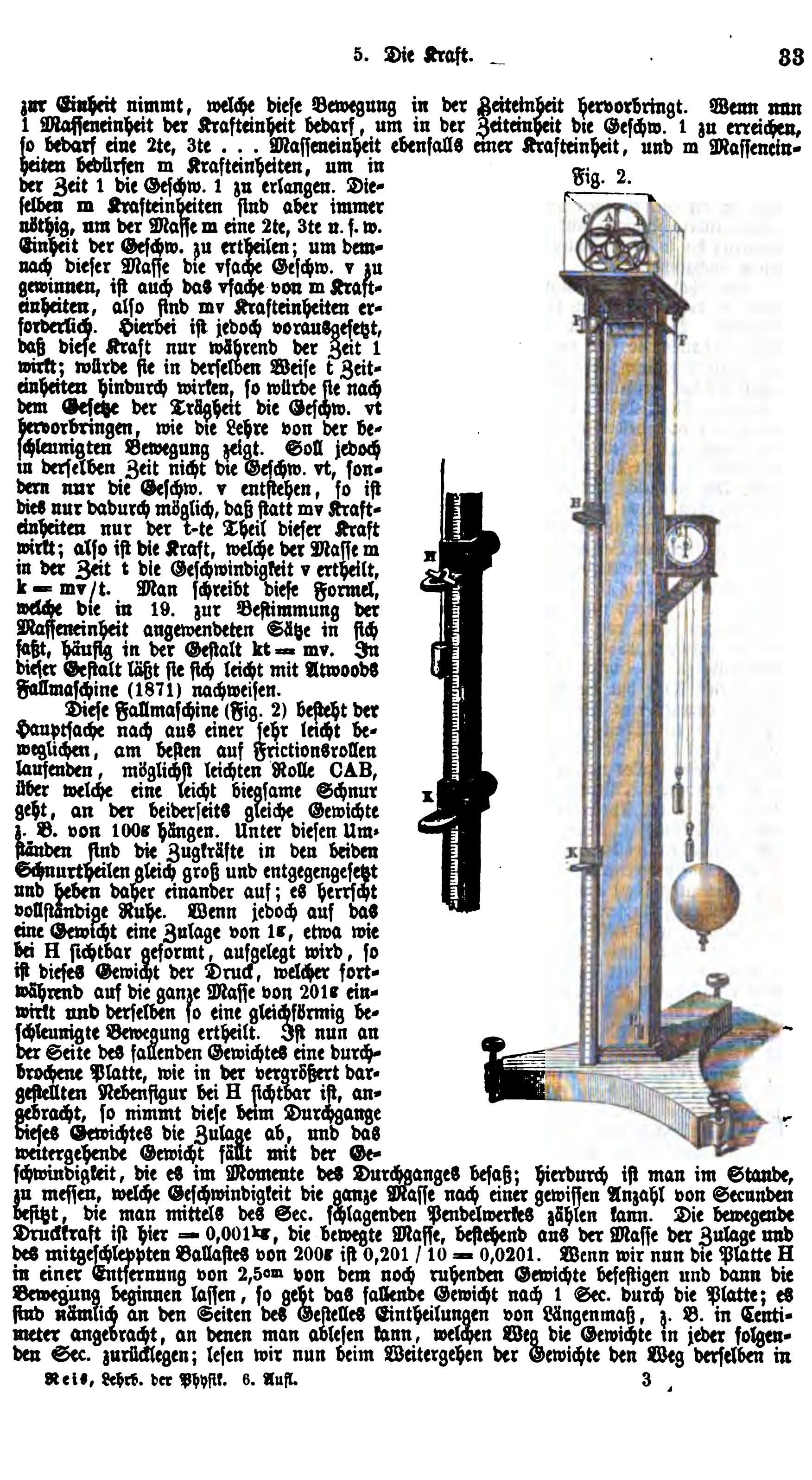
$$k = mg \text{ oder } k = p \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

Der Druck oder Zug, welcher einem frei fallenden Körper in jeder Secunde die Geschwindigkeit g ertheilt, ist demnach gleich dem Gewichte des Körpers.

Wie man den Druck oder Zug, der den freien Fall erzeugt, durch das Gewicht des Körpers mißt, so kann man auch jeden anderen Druck oder Zug durch das Gewicht ausdrücken, das den Druck oder Zug ausübt. Dieses seit alter Zeit gebräuchliche „statische Kräftemaß“ erscheint hier durch den Begriff der Masseneinheit in Zusammenhang mit dem schon von Cartesius oder Descartes (1640) verlangten und von Gauß eingeführten „dynamischen Kräftemaß.“ Es ist nun unsere Aufgabe, dieses eigentlich theoretische Kräftemaß abzuleiten und nachzuweisen; obwohl die beiden übrigen nur andere Formen desselben, also mit demselben begründet sind, so verlangt es doch die Wichtigkeit des Gegenstandes, auch diese einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

23 Ableitung und Nachweis der Formel $k = mv/t$. Wenn Kraft als Ursache der Bewegung definirt wird, so ist es folgerichtig, als Krafteinheit eine solche Kraft zu nehmen, die eine bestimmte Bewegung hervorbringt; man könnte jede beliebige Bewegung zu Grunde legen; die Größe jeder Kraft ist jedoch am einfachsten auszudrücken, wenn man nach Gauß die Bewegung der Masseneinheit mit der Geschwindigkeitseinheit wählt, und die Kraft

zur Einheit nimmt, welche diese Bewegung in der Zeiteinheit hervorbringt. Wenn nun 1 Masseneinheit der Krafteinheit bedarf, um in der Zeiteinheit die Geschw. 1 zu erreichen, so bedarf eine 2te, 3te . . . Masseneinheit ebenfalls einer Krafteinheit, und m Masseneinheiten bedürfen m Krafteinheiten, um in der Zeit 1 die Geschw. 1 zu erlangen. Dieselben m Krafteinheiten sind aber immer nöthig, um der Masse m eine 2te, 3te u. s. w. Einheit der Geschw. zu ertheilen; um demnach dieser Masse die vfache Geschw. v zu gewinnen, ist auch das vfache von m Krafteinheiten, also sind mv Krafteinheiten erforderlich. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, daß diese Kraft nur während der Zeit 1 wirkt; würde sie in derselben Weise t Zeiteinheiten hindurch wirken, so würde sie nach dem Gesetze der Trägheit die Geschw. vt hervorbringen, wie die Lehre von der beschleunigten Bewegung zeigt. Soll jedoch in derselben Zeit nicht die Geschw. vt, sondern nur die Geschw. v entstehen, so ist dies nur dadurch möglich, daß statt mv Krafteinheiten nur der t-te Theil dieser Kraft wirkt; also ist die Kraft, welche der Masse m in der Zeit t die Geschwindigkeit v ertheilt, $k = mv/t$. Man schreibt diese Formel, welche die in 19. zur Bestimmung der Masseneinheit angewendeten Sätze in sich faßt, häufig in der Gestalt $kt = mv$. In dieser Gestalt läßt sie sich leicht mit Atwoods Fallmaschine (1871) nachweisen.


Fig. 2.

Diese Fallmaschine (Fig. 2) besteht der Hauptsache nach aus einer sehr leicht beweglichen, am besten auf Frictionsrollen laufenden, möglichst leichten Rolle CAB, über welche eine leicht biegsame Schnur geht, an der beiderseits gleiche Gewichte z. B. von 100g hängen. Unter diesen Umständen sind die Zugkräfte in den beiden Schnurtheilen gleich groß und entgegengesetzt und heben daher einander auf; es herrscht vollständige Ruhe. Wenn jedoch auf das eine Gewicht eine Zulage von 1g, etwa wie bei H sichtbar geformt, aufgelegt wird, so ist dieses Gewicht der Druck, welcher fortwährend auf die ganze Masse von 201g einwirkt und derselben so eine gleichförmig beschleunigte Bewegung ertheilt. Ist nun an der Seite des fallenden Gewichtes eine durchbrochene Platte, wie in der vergrößert dargestellten Nebenfigur bei H sichtbar ist, angebracht, so nimmt diese beim Durchgange dieses Gewichtes die Zulage ab, und das weitergehende Gewicht fällt mit der Geschwindigkeit, die es im Momente des Durchganges besaß; hierdurch ist man im Stande, zu messen, welche Geschwindigkeit die ganze Masse nach einer gewissen Anzahl von Secunden besitzt, die man mittels des Sec. schlagenden Pendelwerkes zählen kann. Die bewegende Druckkraft ist hier $= 0{,}001^{kg}$, die bewegte Masse, bestehend aus der Masse der Zulage und des mitgeschleppten Ballastes von 200g ist $0{,}201 / 10 = 0{,}0201$. Wenn wir nun die Platte H in einer Entfernung von $2{,}5^{cm}$ von dem noch ruhenden Gewichte befestigen und dann die Bewegung beginnen lassen, so geht das fallende Gewicht nach 1 Sec. durch die Platte; es sind nämlich an den Seiten des Gestelles Eintheilungen von Längenmaß, z. B. in Centimeter angebracht, an denen man ablesen kann, welchen Weg die Gewichte in jeder folgenden Sec. zurücklegen; lesen wir nun beim Weitergehen der Gewichte den Weg derselben in

jeder Sec. ab, so finden wir, daß die Geschwindigkeit $5^{cm} = 0{,}05^{m}$ beträgt. Setzen wir diese Werthe in unsere nachzuweisende Gleichung $kt = mv$ ein, so erhalten wir $0.001 \cdot 1 = 0{,}0201 \cdot 0{,}05$ oder $0{,}001 = 0{,}001$; unsere Werthe machen also die Gleichung identisch, d. h. sie sind richtig, und die Gleichung ist gültig. So kann man die Platte H an beliebigen Stellen befestigen, immer die Zeit des Durchganges und die dann folgende Geschw. beobachten, in die Gl. einsetzen und dadurch deren Richtigkeit bewährt finden. Auch kann man beliebige andere Zulagen und andere Ballaste verwenden und immer nach derselben Methode verfahren; da in allen Fällen die Gl. immer richtig bleibt, so ist ihre allgemeine Gültigkeit hiermit nachgewiesen.

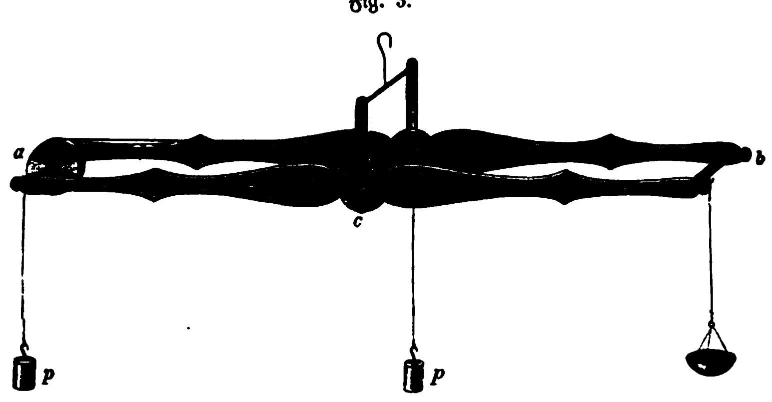
Auf ähnliche Weise kann man auch, obwohl dies hiermit schon im Allgemeinen geschehen ist, die einzelnen, in diesen Formeln (7) enthaltenen und schon in 19. benutzten Sätze nachweisen. Wenn nämlich 2 verschiedene Massen m und m' in gleichen Zeiten dieselben Geschw. erhalten, so sind die hierzu nöthigen Kräfte $k = mv / t$ und $k' = m'v / t$, woraus durch Division sich ergibt $k : k' = m : m'$, d. h. bei in gleichen Zeiten erlangten gleichen Geschw. verhalten sich die Kräfte wie die Massen. In unserem ersten Versuche wiegt die bewegte Masse 201^{g}, die Kraft ist 1^{g}, und die nach 1 Sec. erlangte Geschw. ist 5^{cm}. Hängen wir nun beiderseits 200^{g} an, so müssen wir eine Zulage von 2^{g} anbringen, um in derselben Zeit dieselbe Geschw. zu erzielen; in diesem Falle ist die bewegte Masse die von 402^{g} und die Kraft 2^{g}, womit die Richtigkeit des Satzes erwiesen ist; denn $1 : 2 = 201 : 402$. Ebenso läßt sich leicht der Satz nachweisen: bei gleichen Massen verhalten sich die Kräfte wie die in gleichen Zeiten erlangten Geschwindigkeiten, oder $k : k' = v : v'$.

Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgehen, daß hier ein scheinbarer Widerspruch mit einem früheren Versuchsresultat vorliegt; wir fanden nämlich früher durch directe Fallversuche, daß die Acceleration der Erdschwere 10^{m} beträgt, während wir bei den Versuchen dieses Abschnittes die in 1 Sec. erreichte Geschw. nur $= 5^{cm}$ fanden. Dies ist aber kein Widerspruch, sondern nur eine neue Bestätigung unseres Gesetzes (7); dasselbe enthält nämlich auch den Satz, daß bei gleichen Kräften die in gleichen Zeiten erreichten Geschw. sich umgekehrt wie die Massen verhalten; in einem Falle ist nämlich $k = mv / t$, in einem anderen $k = m'v' / t$, woraus durch Gleichsetzung $mv = m'v'$ oder $v : v' = m' : m$. Beim freien Falle hat die Kraft von 1^{g} nur ihre eigene Masse zu bewegen, bei unserem Versuche dagegen eine Masse von 201^{g}; die 201 fache Masse erhält aber durch dieselbe Kraft nur den 201 ten Theil der Geschw., also ist die Geschwindigkeit $v' = 10^{m} / 201 = 5^{cm}$; umgekehrt ist durch die Acceleration von 5^{cm} an der Fallmaschine abermals die Acceleration 10^{m} des freien Falles nachgewiesen. Gerade dieser Umstand, daß bei Atwoods Fallmaschine die Acceleration viel kleiner ist als beim freien Falle, gewährt uns die Möglichkeit, trotz der geringen Höhe des Apparates ausgedehnte Fallversuche anzustellen und die Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung nachzuweisen, was wir jedoch bis zu der Lehre vom freien Falle verschieben wollen. — Weiter wird dem aufmerksamen Leser hier eine Bestätigung der oft ausgesprochenen Thatsache aufstoßen, daß ein todter Druck oder Zug zur Erzeugung einer Bewegung nicht ausreicht, sondern daß der Träger desselben, hier das Zulagegewicht, selbst in Bewegung sein muß, daß demnach die Kraft nicht in Druck und Zug für sich besteht, sondern in Druck oder Zug in Bewegung, in Massenbewegung. Es kann diese Thatsache nicht eindringlich genug betont werden, da aus der irrigen Ansicht über das Wesen der Kraft noch immer Versuche auftauchen, das perpetuum mobile zu finden; manche von diesen unglücklichen Bestrebungen, welche nicht selten das Glück ganzer Familien zerstören, beruhen darauf, daß es durch Combination von Apparaten gelungen ist, Druckvergrößerungen zu gewinnen, während es sich doch in den Maschinen nicht um Druck, sondern um Bewegung, um Arbeit handelt.

Aufg. 17. Welche Kraft ist nöthig, um einem Körper von 50^{kg} in 10 Secunden eine Geschw. von 20^{m} zu ertheilen? Aufl.: $k = 10^{kg}$. — A. 18. Welche Geschw. erlangt ein Körper von 80^{kg} in 5 Sec. durch eine Kraft von 20^{kg}? Aufl.: $v = 12{,}5^{m}$. — A. 19. Wenn das Geschoß einer 15^{cm}-Ringkanone 20^{kg} wiegt und $^{1}/_{300}$ Secunde im Laufe verweilt, wie groß ist die Kraft des explodirenden Pulvers? Aufl.: $k = 300000^{kg}$. — A. 20. Wenn aber der Druck nur $60\,000^{kg}$, wie man annimmt, groß ist, wie lange muß dann die Kugel im Rohre verweilen? Aufl.: $t = 0{,}01667$ Sec. — A. 21. Ein frei fallender Körper erlangt durch sein eigenes Gewicht in 1 Sec. eine Geschw. von 10^{m}; welcher Ballast müßte zu beiden Seiten der Fallmaschine noch angehängt werden, damit erst in 8 Sec. eine Geschw. von 1^{m} erreicht würde? Aufl.: $k = (p / 10)\, 10 = ((p + x) / 10)\, ^{1}/_{8}$; hieraus $x = 79p$. — A. 22. An den Schnurenden der Fallmaschine hängen jederseits 400^{g}, auf der einen Seite ist ein Uebergewicht von 5^{g}; wie groß wird die Geschw. nach 4 Sec. sein? Aufl. $v = {}^{40}/_{161}{}^{m}$. — Diese Beispiele weisen darauf hin, daß eine bewegende Kraft nicht aus einem ruhenden Drucke oder Zuge bestehen kann, daß also eine Bewegung erzeugende Kraft selber in Bewegung sein muß.

Nachweis der zweiten Formel $k = ma$. Eigentlich ist das zweite Maß für die Kraft nur ein specieller Fall des ersten und demnach mit demselben nachgewiesen. Indessen wollen wir noch einen besonderen Nachweis für dieses Maß beibringen, da dieses Kräftemaß überhaupt nach allen Seiten möglichst klar zu machen ist, und da dieser Nachweis noch eine merkwürdige Beziehung aufklärt: derselbe wird mit Poggendorffs Fallmaschine (1858) geführt, welche auf einer Beobachtung beruht, die wenig bekannt, sehr auffällig ist und schon von dem arabischen Gelehrten Al Khazini in seinem „Buche der Weisheit" im 12. Jahrh. mit folgenden Worten angeführt wird: „Das Gewicht eines Körpers, welches an einer bestimmten Stelle einen gewissen Werth hat, ändert sich mit der Entfernung desselben vom Weltcentrum, so daß dasselbe schwerer wird, wenn man ihn vom Centrum entfernt, leichter, wenn man ihn näher bringt." Man beobachtet dies am leichtesten mit Poggendorffs Fallmaschine, Fig. 3. 24

Fig. 3.



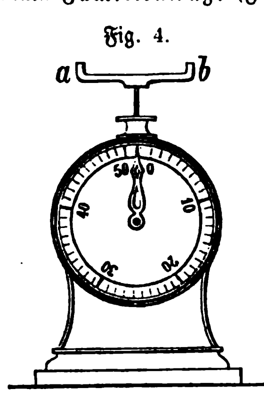
Dieselbe besteht aus einem Wagbalken ab, der aus 2 parallelen Schienen zusammengesetzt ist, zwischen denen sich am Mittelpunkte und an einem Ende, z. B. am linken, leicht bewegliche Rollen c und a befinden; über diese Rollen geht eine Schnur, an der gleiche Gewichte p hängen; das an der linken Rolle hängende Gewicht mit der Rolle ist durch eine Wagschale mit Gewichten am rechten Arme balancirt. Legt man nun auf das mittlere Gewicht eine Zulage q, so sinkt diese Masse und die linke steigt. Sowie aber diese Masse steigt, sinkt die ganze Wagbalkenhälfte, woraus deutlich zu erkennen ist, daß durch das Steigen der linken Masse ihr Gewicht scheinbar zugenommen hat; die Ursache liegt darin, daß die Masse m desselben in jeder Secunde eine gewisse Acceleration a nach oben erfährt, daß hierzu eine Kraft ma nach oben nöthig ist, und daß demnach die Masse durch ihre Trägheit dem Steigen stets einen Widerstand ma entgegensetzt, der an der Schnur einen Zug ma nach unten hervorbringt und so das Gewicht um ma vermehrt, was auch aus dem Satze „actio est par reactioni" folgt. Diese Masse m kann man leicht nach der Fl. (6) berechnen und die Acceleration a nach dem Gesetze, daß bei gleichen Kräften die in 1 Sec. erreichten Geschwindigkeiten sich umgekehrt wie die Massen verhalten. Würde das Uebergewicht q nur seine Masse in Bewegung zu setzen haben, so würde seine Acceleration g sein; nun hat es aber die Masse der Gewichte $2p + q$ zu bewegen; folglich gilt für die Acceleration a die Proportion $a : g = q : (2p + q)$, woraus $a = qg / (2p + q)$. Hieraus läßt sich leicht für jedes beliebige Gewicht p und jede beliebige Zulage q der Werth von a berechnen und hierdurch die Zunahme des Gewichtes ma finden; legt man dieselbe in die Schale des Gegengewichtes am rechten Wagbalkenende, so wird das Sinken der linken Hälfte verhindert; hiermit ist nicht nur die Richtigkeit der Erklärung dieser seltsamen Erscheinung, sondern auch der Formel $k = ma$ nachgewiesen. In einfacher Weise ist auch die umgekehrte Erscheinung darzuthun, daß während des Fallens der linken Masse p ihr Gewicht scheinbar abnimmt, indem sie dem Fallen durch ihre Trägheit einen Widerstand entgegensetzt und dadurch an sich selbst einen Zug nach oben ausübt, der den Zug an der Schnur vermindert. Während des Fallens der linken Masse steigt die linke Wagbalkenhälfte. Das Steigen wird verhindert, wenn man aus der Wagschale das Gewicht ma herausnimmt; hierdurch ist nachgewiesen, daß der Widerstand der mit der Beschleunigung a fallenden Masse m gleich ma ist, und daß demnach die dem Widerstande gleiche beschleunigende Kraft k durch ma gemessen wird.

Macht man die Voraussetzung, daß verschiedene Kräfte auf gleiche Massen wirken, so haben die Massen keinen Einfluß auf die Verschiedenheit der Kräfte: dieselben können dann

durch die von ihnen in 1 Sec. erzeugten Geschw. oder die Accelerationen gemessen und dargestellt werden; die lineare Versinnlichung der Kräfte geschieht sogar am häufigsten durch Geschwindigkeiten. Will man Kräfte durch gerade Linien darstellen, so zeichnet man Strecken von derjenigen Größe und Richtung, welche ein und derselbe Körper durch die Wirkung jener Kräfte in 1 Sec. oder in einer anderen für alle Kräfte gleichen Zeit zurücklegen würde. — Auch die verschiedenen Anziehungen der Weltkörper gegen die auf ihren Oberflächen befindlichen Massen, die Schwerkräfte der Weltkörper gibt man durch die Accelerationen an, welche sie beim freien Fall den Körpern ertheilen; so ist die Acceleration der Erdschwere ca 10m, d. h. die Erde ertheilt jeder frei fallenden Masse, einerlei ob sie groß oder klein ist, in einer Sec. eine Geschw. von 10m; die Sonne aber ertheilt jeder auf ihr frei fallenden Masse eine Geschw. von 270m; da auch hier die Massen ohne Einfluß sind, so können die Gravitationen von Erde und Sonne durch die Accelerationen 10 und 270m gemessen werden; deßhalb werden diese Zahlen mit g bezeichnet. Uebrigens darf man aus der Thatsache, daß die Acceleration aller frei fallenden Körper 10m ist, nicht den irrthümlichen Schluß ziehen, daß die Erde alle Körper mit gleicher Kraft anziehe. Die Anziehung steht vielmehr im geraden Verhältnisse zu den Massen; 1000 Atome eines Körpers erfahren eine 1000mal so große Anziehung wie ein Atom, sie bedürfen aber auch nach den Kraftgesetzen einer 1000mal so großen Kraft, um dieselbe Geschw. zu erreichen wie ein Atom; sie erhalten also durch die größere Anziehung genau dieselbe Acceleration. Die Acceleration g ist demnach wohl das Maß für die verschiedene Gravitation der Weltkörper, nicht aber für die verschiedene Anziehung, welche verschiedene Massen auf einem und demselben Weltkörper durch diesen erleiden; da hier der Einfluß der Massen nicht wegfällt, so dürfen wir in der Formel $k = ma$ die Masse nicht weglassen; dieselbe nimmt daher hier die Gestalt an $k = mg$. Da nun mg nach Fl. (6) das Gewicht p der Masse ausdrückt, so ist $k = p$; d. h. die Anziehung der Erde gegen einen Körper wird durch dessen Gewicht gemessen. Ebenso kann auch jede andere Zug- und Druckkraft durch Gewichte ausgedrückt werden.

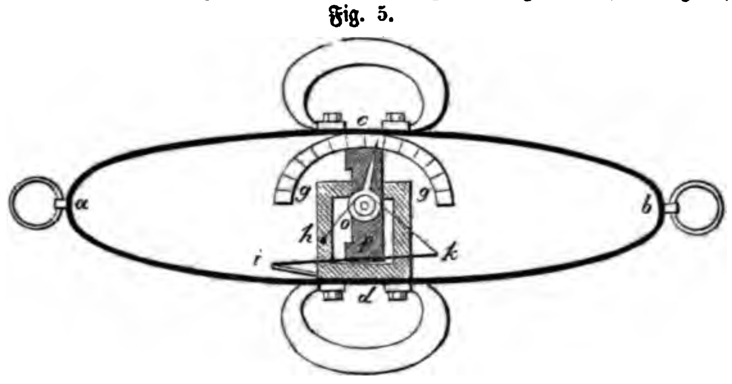
25 *Nachweis der dritten Formel* $k = p$. Jede Zug- und Druckkraft läßt sich durch ein Gewicht ersetzen, also durch ein Gewicht messen. Am einfachsten ist dies an der neuen *Familienwage* (Fig. 4) ersichtlich. Legt man auf die Schale ab derselben Gewichte von 1 bis 50kg, so dreht sich ein Zeiger auf der kreisförmigen Skale und bleibt bei der Zahl stehen, welche mit der Zahl der aufgelegten kg stimmt. Nimmt man nun die Gewichte weg und übt mit der Hand einen Druck auf die Schale aus, so bewegt sich der Zeiger ebenfalls voran und zwar um so weiter, je stärker man drückt; ein Mann vermag einen Druck von 50kg auszuüben. Ebenso kann man eine Schnur über die Schale legen und an beiden Enden derselben ziehen und dadurch den Zeiger vorandrehen. Man kann also sowohl den Druck, als auch den Zug, den man mit der Hand ausübt, durch aufgelegte Gewichte ersetzen und messen. Dasselbe kann mit jedem anderen Drucke oder Zuge geschehen. Wenn wir einen Faden durch Ziehen an beiden Enden zerreißen, so können wir die Größe der ausgeübten Zugkraft ermitteln, indem wir an einen gleichen Faden soviel Gewicht anhängen, daß derselbe reißt; die gesuchte Zugkraft ist dem angehängten Gewichte gleich; und so lange der Faden noch nicht gerissen ist, übt derselbe einen Zug aus, der nach dem dritten Gesetze der Mechanik dem anhängenden Gewichte gleich ist. — Der Druck, durch welchen wir eine auf einer geneigten Ebene liegende Kugel am Herabrollen hindern oder dieselbe bergan rollen, kann ersetzt und daher gemessen werden durch ein Gewicht, welches an einer von der Kugel ausgehenden und über eine Rolle geführten Schnur hängt. — Die ausdehnende Kraft des Dampfes, der in einem Cylinder einen Kolben vor sich her schiebt, könnte durch ein Gewicht ersetzt und gemessen werden, das in ähnlicher Weise an dem Kolben angebracht wäre. — Die abstoßende Kraft der Wärme, welche einen Körper ausdehnt, muß einem Gewichte gleich sein, welches auf dem Körper liegend diese Ausdehnung eben verhindert, ohne den Körper zusammenzudrücken. — Wenn eine hohe Spiralfeder durch ein aufgelegtes Gewicht zusammengedrückt wird, so ist ihr Bestreben, sich wieder auszudehnen, ihre Federkraft oder Elasticität, bei dem erreichten Grade der Zusammendrückung dem Gewichte gleich. Wenn man daher durch irgend eine andere Kraft denselben Grad der Zusammendrückung bewirkt, so ist diese Kraft ebenfalls gleich der Federkraft, also auch jenem Gewichte gleich. Hierauf beruht Regniers *Kraftmesser* oder *Dynamometer*, mittels dessen man jede beliebige Zug- oder Druckkraft durch Gewichte ausdrücken kann.

Fig. 4.



Diese Geräthschaft (Fig. 5) besteht aus einem oval gekrümmten federnden Stahlreifen, der sowohl an seinen Längenenden a und b, als an seinen Breitenenden c und d Handgriffe oder Hängringe trägt. Von den Stellen c und d aus gehen nach innen Metallarme; der obere einfache Arm cf trägt in der Mitte o der ganzen Ovale einen kleinen Zapfen, auf welchem lose ein Röllchen sitzt, das sich an der Hinterseite in einen Zeiger verlängert. Dieser spielt auf einem um den Mittelpunkt o beschriebenen, getheilten Bogen, der ebenfalls auf dem Arme cf sitzt. Der zweite, doppelte Arm dg trägt einen Stift h und einen schwach federnden Stahlstreifen lk, von dessen Ende k ein Faden sich straff über das Röllchen nach dem Stifte h spannt. Wenn an den Breitenenden gedrückt oder an den Längenenden gezogen wird, bewegen sich die Arme etwas gegen einander und der Zeiger, der im Ruhezustande auf den mittleren oder Nullpunkt der Skale weist, dreht sich nach rechts; wird dagegen an den Breitenenden gezogen oder an den Längenenden gedrückt, so bewegen sich die

Fig. 5.



Arme aus einander, und der Zeiger dreht sich nach links; die an den vom Zeiger erreichten Strichen stehenden Zahlen geben die Größe der ausgeübten Kraft an. Diese Zahlen wurden empirisch ermittelt; die Geräthschaft wurde an einem Ende aufgehängt, am anderen Ende durch Gewichte beschwert, und dann das Gewicht an der erreichten Zeigerstelle angemerkt. Will man z. B. die Zugkraft eines Pferdes ermitteln, so wird der Apparat z. B. an eine Säule befestigt und das Pferd an den Apparat gespannt und dann zum Ziehen angetrieben. Menschen können Zug- und Druckkräfte von ca 50kg, Pferde von 200 bis 300kg ausüben. Auch die Messung der Kräfte durch Gewichte macht es möglich, dieselben als Linien darzustellen; man zeichnet gerade Linien, die nach dem Punkte zulaufen, auf welchen die Kräfte wirken und den man Angriffspunkt nennt, und deren Richtungen mit denen der Kräfte zusammen fallen; die Längen der Geraden macht man gleich so vielen beliebigen Längeneinheiten als die Kraft beliebige Gewichteinheiten enthält. Die Familienwage ist ein Dynamometer für kleinere Kräfte.

3. Wirkungen der Kräfte. a. Die Arbeit. Die im practischen Leben **26** wichtigste Wirkung der Kräfte ist die Arbeit. Unter Arbeit verstehen wir die Ueberwindung eines Widerstandes auf jedem Punkte eines gewissen Weges.

Wenn z. B. ein Körper in die Höhe gehoben werden soll, so muß das Gewicht also der Druck des Körpers nach unten an jeder Stelle des Höhenweges getragen werden. Wird ein Körper auf einer wagrechten Bahn fortgeschoben, so ist zwar sein Gewicht nicht zu heben; indessen erfährt man doch fortwährend einen Widerstand, den Widerstand der Reibung, dem man auf jedem Punkte des Schubweges einen gleichen Druck entgegensetzen muß. Soll ein Stück Holz durchgesägt werden, so hat man an jeder Stelle des Weges der Säge die Festigkeit der Fasern zu bewältigen. Kurz jede Arbeit besteht darin, daß eine Gegenkraft, ein entgegenwirkender Druck oder Zug, ein Widerstand auf jedem Punkte eines gewissen Weges überwunden werden muß. Die Arbeit ist offenbar um so größer, je größer der Widerstand und je größer der Weg ist. Wenn man statt 1kg deren 2 auf gleiche Höhe hebt, so hat man offenbar 2mal soviel Arbeit verrichtet; wenn eine Locomotive 20 Lastwagen von gleichem Gewicht nachschleppt, so ist ihre Arbeit 20mal so groß als bei dem Fortziehen eines Wagens. Ebenso wächst aber auch die Arbeit direct mit dem Wege; wird ein Gewicht auf 3fache Höhe gehoben, so hat es eine 3mal so große Arbeit erfahren; die Fahrpreise richten sich nicht allein nach den transportirten Massen, sondern wachsen auch in gleichem Maße mit den Entfernungen.

Die *Einheit der Arbeit* ist diejenige Arbeit, die nothwendig ist, wenn ein Widerstand von 1^{kg} auf einem Wege von 1^{m} überwunden wird; man nennt diese Einheit der Arbeit *Meterkilogramm* und bezeichnet sie mit **mk**. Die Arbeit, welche nöthig ist, um einen Widerstand von q^{kg} auf dem Wege von h^{m} zu überwinden, ist folglich $= qh^{mk}$; die Arbeit, welche ein Widerstand, eine Gegenkraft in Anspruch nimmt, wenn sie auf einem gewissen Wege überwunden wird, ist demnach das Product der Gegenkraft mit dem Wege. Der Widerstand nimmt diese Arbeit in Anspruch, consumirt sie, erleidet sie; man nennt sie daher *consumirte oder erlittene Arbeit*. Diese Arbeit kann nicht durch einen ruhenden Druck oder Zug geleistet werden, sondern nur durch einen Druck oder Zug in Bewegung; denn eine ruhende Kraft vermöchte eine Gegenkraft wohl an einem Punkte, nicht aber an allen Stellen eines Weges aufzuheben; es muß also der wirksame Druck oder Zug, die Kraft k, ebenfalls einen gewissen Weg s zurücklegen; hierbei bringt die Kraft k eine Arbeit hervor. Wie die vom Widerstande consumirte Arbeit gefunden wird, indem man diese Gegenkraft mit dem Wege multiplicirt, so wird auch die von der Kraft producirte oder geleistete Arbeit gefunden, indem man sie mit dem Wege multiplicirt; *die von der Kraft producirte oder geleistete Arbeit ist demnach gleich dem Producte der Kraft mit dem Wege*, $= ks$.

Wie wir später sehen werden, ist die von der Kraft producirte Arbeit gleich der von dem Widerstande, der Last, consumirten Arbeit, wie es schon das 3te Gesetz der Mechanik ausspricht. Der Begriff der Arbeit ist der wichtigste Begriff der neueren Physik; auch hier erfahren wir wieder, daß dasjenige, was Bewegung erzeugt, was eine practische Wirkung hervorbringt, nicht der ruhende Druck oder Zug, sondern das Product von Druck oder Zug in den Weg ist; die Kraft ist Arbeit. Es wäre vorzuziehen, wenn die Benennung Kraft nur Arbeit bedeuten würde; indessen ist es bis jetzt nicht zu vermeiden, auch den blosen Druck oder Zug mit Kraft zu bezeichnen, wie es in obigen Betrachtungen geschehen ist und noch weiter geschehen wird. Der Körper, welcher Arbeit entwickelt, wird *Motor* genannt; so ist fließendes oder hochstehendes Wasser ein Motor, Dampf ist ein Motor, Menschen und Thiere sind Motoren. Indessen wird der Name Motor auch häufig für die Maschine angewendet, auf welche der die Arbeit entwickelnde Stoff einwirkt, oder welche die Arbeit dieses Motors aufnimmt; so nennt man ein Wasserrad, eine Dampfmaschine manchmal Motor. oft werden jedoch diese Maschinen Kraftmaschinen genannt, während eine Maschine, die mittels eines Motors Arbeiten verrichtet, welche früher von Handwerkern verrichtet wurden, Arbeitsmaschinen genannt werden; so sind die Hobelmaschinen, die mechanischen Drehbänke, die Maschinensägen u. s. w. Arbeitsmaschinen.

Aufg. 23. Welche Arbeit consumirt ein Gewicht von 200^{kg}, wenn es 17^{cm} hoch gehoben wird? Aufl.: $200 . 0,17 = 34^{mk}$. — A. 24. Welche Arbeit ist nöthig, um einen Menschen von 80^{kg} Gewicht zwei Treppen hoch von 40 Stufen à 20^{cm} Höhe zu befördern? Aufl.: 640^{mk}. — A. 25. Welche Arbeit producirt ein Mensch von 70^{kg} Gewicht, der eine Last von 20^{kg} auf einen Berg von 500^{m} Höhe trägt? Aufl.: 45000^{mk}. — A. 26. Welche Arbeit verrichtet dieser Mensch, wenn er auf wagrechter Bahn 1 M. weit geht, vorausgesetzt, daß ein Mensch bei jedem Schritte (à 60^{cm}) seinen Körper 2^{cm} heben muß, und wenn wir die Arbeit zur Bewegung der Glieder außer Berechnung lassen? Aufl.: $70 (7420 / 0,6) . 0,02 = 17313\frac{1}{3}{}^{mk}$. — A. 27. Welche Arbeit consumirt ein Postwagen, der mit dem Inhalt 1500^{kg} wiegt, auf einer wagrechten Straße von 3 M. Länge; auf wagrechten Straßen wird der Widerstand, den ein Wagen durch die Reibung entwickelt, zu $\frac{1}{30}$ seines Gewichtes geschätzt? Aufl.: $\frac{1}{30} . 1500 . 3 . 7420 = 1\,113000^{mk}$. — A. 28. Ein Eisenbahnzug leistet durchschnittlich einen Widerstand von $\frac{1}{200}$ seines Gewichtes; welche Arbeit ist nöthig, um einen Zug 1 M. weit fortzubewegen, wenn er hierbei um 100^{m} steigt; das Gewicht des Zuges betrage 150^{t} à 20 Ctr. oder 1000^{kg}? Aufl.: $\frac{1}{200} . 150\,000 . 7420 + 150\,000 . 100 = 20\,565\,000^{mk}$. (Aus den hierbei auftretenden großen Zahlen ergibt sich die Nothwendigkeit einer anderen Schätzungsweise; diese ist dadurch möglich, daß man die Arbeit für eine kurze Zeit in's Auge faßt und eine größere Einheit zu Grunde legt.) — A. 29. Welche Arbeit consumirt ein Holzschlitten von 10^{kg} Gewicht, der 50^{kg} trägt, wenn er auf einer ebenen Bahn 1000^{m} fortbewegt werden soll, auf welcher die Reibung $\frac{1}{2}$ der Last beträgt? Aufl.: $\frac{1}{2} . 60 . 1000 = 30\,000^{mk}$. — A. 30. Wie groß wird die Arbeit, wenn Räder angebracht werden, wodurch die Reibung auf $\frac{1}{20}$ der Last sinkt? Aufl.: 3000^{km}. — A. 31.

Wie groß ist in beiden Fällen die Arbeit, wenn eine Steigung der Bahn von 5% stattfindet? Aufl.: Im ersten Falle $30000 + 60.50 = 33000^{mk}$, im zweiten Falle 6000^{mk}. — A. 32. Welche Arbeit nimmt ein Rammklotz von 500^{kg} in Anspruch, wenn er während 8 Stunden jede Minute 10 mal auf eine Höhe von 1^{m} zu heben ist und die Reibung $^{1}/_{25}$ der Last beträgt? Aufl.: $10.60.8.1\,(500 + 20) = 2496000^{mk}$. — A. 33. Welche Arbeit ist nöthig, um einen Eimer voll Wasser, 36^{kg} wiegend, aus einem Brunnen von 15^{m} Tiefe zu ziehen, wenn die Reibung $^{1}/_{12}$ der Last beträgt? Aufl.: 585^{mk}. — A. 34. Welche Arbeit producirt eine Wassermasse von 1200^{kg}, die 10^{m} hoch herabstürzt? Aufl.: $1200.10 = 12000^{mk}$. — A. 35. Welche Arbeit leisten 10 Männer, die auf einem Wege von 150^{m} jeder einen Druck von 20^{kg} ausüben? Aufl.: 30000^{mk}. — A. 36. Welche Arbeit producirt Dampf, der mit einem Druck von 3 Atmosphären einen Kolben von 60^{cm} Durchmesser 2000 mal in einem Cylinder von 1^{m} Länge hin- und herschiebt? Aufl.: Eine Atmosphäre erzeugt einen Druck von $1{,}0328^{kg}$ auf 1^{qcm}; daher $ps = 1{,}0328 . 3{,}1416 . 30^{2} . 3 . 4000 = 35042160^{mk}$. — A. 37. Wie läßt sich Arbeit als Fläche darstellen? Als Rechteck (Fig. 6), dessen eine Seite = s und dessen andere Seite = k ist; denn der Inhalt dieses Rechtecks = ks = der Arbeit. — A. 38. Wie groß ist demnach die Arbeit des Dampfes von A. 36 bei einem Kolbenhube, wenn der Druck des Dampfes von 3 Atm. gleichmäßig bis zu 0 abnimmt? Aufl.: Wie leicht aus Fig. 7 ersichtlich $= {}^{1}/_{2}\,ks = {}^{1}/_{2} . 1{,}0328 . 3{,}1416 . 30^{2} . 3 . 1 = 4380^{mk}$. — A. 39. Wie groß ist die Arbeit von 2000 Kolbenspielen? Aufl.: 17521080^{mk}. — A. 40. Wie groß ist die Arbeit, wenn der Druck von 3 bis 2 Atm. regelmäßig abnimmt? Aufl.: Fig. 8 zeigt, daß hier die Arbeit gleich dem Inhalt des Paralleltrapezes ist, also $^{1}/_{2}\,(k + k_{1})\,s = {}^{1}/_{2} . 1{,}0328 . 3{,}1416 . 30^{2}\,(3 + 2) . 4000 = 29201800^{mk}$. — A. 41. Wie ergibt sich die Arbeit, wenn der Druck nach irgend einem anderen Gesetze veränderlich ist? Aufl.: Man zeichnet die Curve ab (Fig. 9), welche durch ihre Ordinaten k das Gesetz ausdrückt und bestimmt, was gewöhnlich durch die Mittel der höheren Mathematik möglich ist, den Inhalt der Fläche abcd, so gibt derselbe die Arbeit an; andernfalls muß man die einzelnen als Rechtecke, Dreiecke oder als Paralleltrapeze zu betrachtenden Flächentheile aus den einzelnen Werthen von k und den Wegstücken s_{1}, s_{2} .... berechnen und die Producte addiren; die Arbeit ist dann $ks = k_{1}s_{1} + k_{2}s_{2} + k_{3}s_{3} + \ldots$ — Aufg. 42. Die mittlere Intensität einer veränderlichen Kraft zu finden? Aufl.: Die mittlere Intensität hat die constante Kraft k, welche auf dem Wege s dieselbe Arbeit leistet wie die veränderliche Kraft; also ist $ks = k_{1}s_{1} + k_{2}s_{2} + k_{3}s_{3} + \ldots$, woraus $k = (k_{1}s_{1} + k_{2}s_{2} + k_{3}s_{3} + \ldots)/s$. —

Fig. 6.

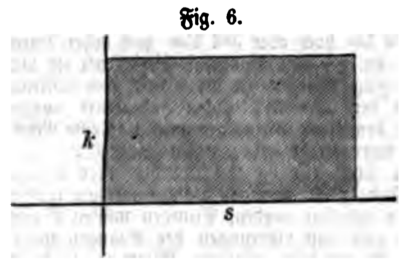


Fig. 7.

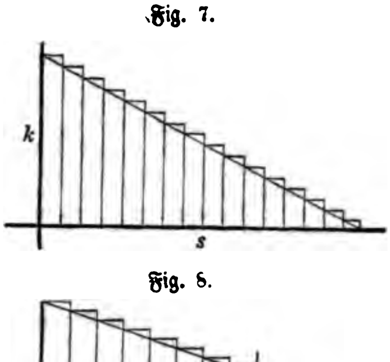


Fig. 8.

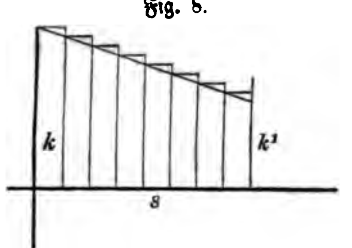
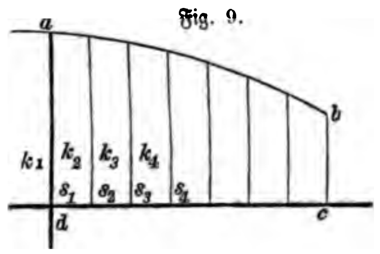


Fig. 9.



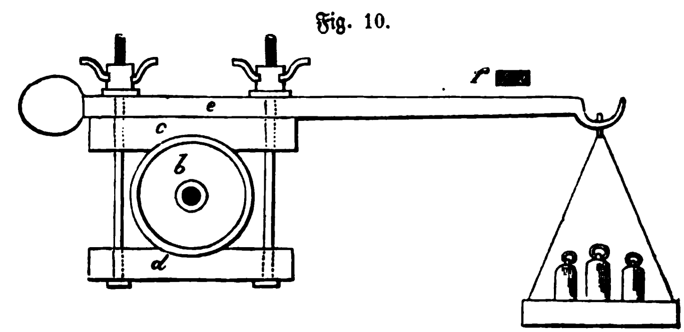
b. Der Effect. Für die theoretische Abschätzung der Arbeit einer Kraft ist die Zeit, welche zur Production der Arbeit nöthig ist, ohne Einfluß; für die practische Anwendbarkeit der Kraft ist aber diese Zeit von großer Wichtigkeit. 27

Eine Kraft wird für die Technik um so wirkungsreicher, in je kürzerer Zeit sie eine gewisse Arbeit leistet. Die Technik legt daher bei ihren Messungen diejenige Arbeit zu Grunde, welche eine Kraft in 1 Secunde leisten kann; man nennt diese Arbeit den **Effect der Kraft**. Da nun der in 1 Sec. zurückgelegte Weg bei der gleichförmigen Bewegung Geschwindigkeit genannt wird, so ist bei gleichförmiger Bewegung der Effect einer Kraft gleich dem **Product der Kraft mit der Geschwindigkeit ihres Angriffspunktes** oder

$$E = k . v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

Ist k in Kilogrammen und v in Metern gegeben, so ist kv die Zahl der in jeder Secunde geleisteten Meterkilogramme. Um nicht zu große Zahlen zu erhalten, ist man übereingekommen, die in 1 Sec. geleistete Arbeit von 75^{mk} eine **Pferdekraft** oder **Pferdestärke** zu nennen, weil ein Pferd bei täglich 8stündiger Arbeitszeit ungefähr diese Arbeit leisten, also in jeder Sec. 75^{kg} 1^m hoch oder 15^{kg} 5^m hoch oder 3^{kg} 25^m hoch heben kann. Der Effect in Pferdekräften ist demnach $E = {}^1/_{75}\,kv$. — Der Ausdruck Pferdekraft ist hier nicht für den vom Pferde ausgeübten Druck oder Zug, sondern für die Arbeit oder Leistung des Pferdes gebraucht; es wäre deßhalb der von dem Verein deutscher Ingenieure vorgeschlagene Ausdruck „Pferdestärke" vorzuziehen; in demselben Sinne genommen ist eine Menschenkraft ungefähr $= {}^1/_{7}$°. Von dem Effecte einer Kraft geht, wenn diese Kraft zum Betriebe einer Kraftmaschine verwendet wird, ein Theil für die Ueberwindung der Widerstände verloren, die in der Maschine vorhanden sind; z. B. in einer Dampfmaschine müssen alle Theile der Maschine bewegt und manche sogar gehoben werden, Pumpen müssen Wasser herbeischaffen, an allen Gelenken, an den Kolben und den Liderungen der Stangen finden Reibungen statt. Zieht man alle diese Effectverluste von dem absoluten Effecte ab, so bleibt der zu äußerer Arbeit verwendbare Effect übrig, der sogenannte **Nutzeffect**. Den Nutzeffect einer Kraftmaschine kann man auch direct bestimmen mittels Pronys **Bremse** oder **Bremsdynamometer**. Die Kraftmaschinen setzen meist eine Walze, die Hauptwelle oder Transmissionswelle genannt, in drehende Bewegung, welche Bewegung dann weiter benutzt wird. Will man den Nutzeffect finden, so wird auf diese Welle a (Fig. 10) eine Rolle b

Fig. 10.



befestigt, welche von 2 durch Schrauben zusammenziehbaren Holzbacken c und d umfaßt wird. Mit dem einen Backen c ist der Hebel e fest verbunden, der an seinem langen Ende eine Wagschale trägt. Dann werden die Schrauben so fest zusammengezogen, daß die Welle nur diejenige Anzahl von Umdrehungen macht, für welche man eben den Nutzeffect finden will. Es wird dann die ganze Bremse von der Welle mitgedreht, wird aber sofort auf derselben schleifen, weil der Hebel e durch den Balken f aufgehalten wird. Der Widerstand, welchen die Maschine jetzt überwinden könnte, ist offenbar dem von ihr überwundenen Betrage der Reibung gleich, welche die Rolle jetzt auf die Holzbalken ausübt. Die Größe dieser Reibung aber kann man finden, wenn man auf die Wagschale so lange Gewichte legt, bis der Hebel e den Balken f verläßt. Dieses Gewicht p, welches vom Mittelpunkte der Welle um die Hebellänge l entfernt ist, wirkt nach den Gesetzen des Hebels, wie wir später sehen werden, nicht mit seinem einfachen Betrage auf den Umfang der Rolle, der um r von dem Mittelpunkt entfernt sei, sondern mit einem im Verhältnisse dieser zwei Entfernungen vergrößerten Betrage; folglich ist die Reibung $= p\,l/r$. Multiplicirt man diese mit der Geschw. der Welle, welche leicht aus der Umbrehungszahl n zu berechnen ist, so hat man den Nutzeffect der Maschine. — Das Pandynamometer von Hirn (1867) beruht auf der Torsion (s. 68).

Zur Bestimmung des absoluten Effectes eines Motors kann man auch Regniers Dynamometer (Fig. 5) benutzen. Drückt z. B. ein Mensch an einem Hebel, um eine Maschine zu drehen, so findet man den Effect desselben, indem man zuerst durch das Dynamometer seine Muskeldruckkraft bei der betreffenden Anstrengung aufsucht und dann seinen in einer gewissen Zeit zurückgelegten Weg mit der Zahl der Secunden dividirt und die so erhaltene Geschwindigkeit mit jenem Drucke multiplicirt.

28 **Aufg. 43.** In einem Wasserfalle stürzen in jeder Sec. 1500^{kg} Wasser von einer Höhe von 5^{m} herab; welches ist der absol. Effect des Wasserfalles? Aufl.: $E = 1500 . 5 = 7500^{mk}$ per Sec. $= 100^{\circ}$. — A. 44. Wie groß ist der Effect von 2 Pferden, welche einen Wagen von 1500^{kg} Gewicht in 2 Stunden 4 M. weit auf ebener Straße ziehen? Aufl.: $1/_{30} . 1500 . 7420 . 4 / (2 . 60 . 60) = 206 1/_{9}{}^{mk} = 2 3/_{4}{}^{\circ}$ ca. — A. 45. Welchen Effect leistet ein Mann von 80^{kg} Gewicht, der 10 Stunden lang zu Fuße geht und dabei 5 M. zurücklegt? Aufl.: $80 (7420 . 5 / 0,6) 0,02 / 36000 = 2 3/_{4}{}^{mk} = 1/_{27}{}^{\circ}$. — A. 46. Welchen Effect leistet dieser Mann, wenn er in diesen 10 Stunden einen Berg von 1 M. Höhe besteigt? Aufl.: $16 1/_{2} + 2 3/_{4} = 19 1/_{4}{}^{mk} = 1/_{4}{}^{\circ}$. — A. 47. Wenn in den Tagen vor der Schlacht bei Sedan die deutschen Soldaten, deren Kriegsausrüstung 35^{kg} wiegt, täglich in 6 Stunden 4 M. zurücklegten und dabei durchschnittlich 10 Hügel von 300^{m} zu überschreiten hatten, wie groß war dann ihr Effect, wenn der Mann durchschnittlich 65^{kg} wog? Aufl.: $[(65 + 35) (7420 . 4 / 0,6) 0,02 + 100 . 3000] / 21600 = 18 1/_{2}{}^{mk} = 1/_{4}{}^{\circ}$. — A. 48. Wenn ein Schmied einen Hammer von 10^{kg} alle 2 Sec. 1 mal 80^{cm} hoch hebt und beim Niederschlagen auch einen Druck von 6^{kg} ausübt, welchen Durchschnitts-Effect bringt er in 8stündiger Arbeit hervor, vorausgesetzt, daß nach je 5 Min. eine Pause von 5 Min. stattfindet? Aufl.: $16 . 08 . 150 / 600 = 3,2^{mk}$. — A. 49. Wenn ein Rammklotz von 500^{kg} per Min. 20 mal auf eine Höhe von 2^{m} gehoben werden soll und die Arbeiter nicht höher als zu einem Effect von 8^{mk} in Anspruch genommen werden, wie viele Leute sind dann anzustellen? Aufl.: $500 . 2/_{3} = 8n$; daraus $n = 41 2/_{3}$. — A. 50. Welchen Effect bedarf ein Eisenbahnzug von 100^{t} mit 12^{m} Geschwindigkeit? Aufl.: $100000 . 1/_{200} . 12 = 6000^{mk} = 80^{\circ}$. — A. 51. Welcher Effect ist nöthig, um mittels einer Pumpe per Min. 2 Ohm $= 320^{l}$ Wasser aus einer Tiefe von 15^{m} zu heben, wenn die Hindernisse der Bewegung der Hälfte der Last gleich kommen? Aufl.: $(3/_{2} . 320 . 15) / 60 = 120^{mk} = 1,6^{\circ}$. — A. 52. Wie groß ist der absolute Effect einer Dampfmaschine, wenn der Dampf eine Spannung von 4 Atmosphären hat, und wenn der 40^{cm} breite Kolben in jeder Sec. $1,5^{m}$ zurücklegt? Aufl.: 1 Atmosphäre übt auf 1^{qcm} einen Druck von $1,0328^{kg}$ aus; also ist der Druck auf den Kolben $= 20^{2} . 3,1416 . 4 . 1,0328 = 5191^{kg}$; daher der Effect $= 5191 . 1,5 = 7787^{mk} = 104^{\circ}$. — A. 53. In einer Nudelmühle geht ein Pferd, das nach einem Dynamometer-Versuch durchschnittlich einen Druck von 30^{kg} ausübt, an einem Hebel von 5^{m} Länge in einer Stunde 120 mal im Kreise; welchen Effect producirt das Pferd? Aufl.: $E = 31,416^{mk}$.

29 c. Die lebendige Kraft (Leibnitz 1686). Die dritte Kraftwirkung ist die lebendige Kraft. Eine Kraft kann nämlich nicht blos durch Ueberwindung von Gegenkräften oder Widerständen Arbeit leisten, sondern ihre Wirkung kann auch darin bestehen, daß sie eine vollkommen freie, ruhende Masse in Bewegung versetzt, oder, was dasselbe ist, daß sie die Geschwindigkeit einer schon bewegten Masse vergrößert oder verkleinert, oder daß sie neben der Ueberwindung eines Widerstandes auch noch Geschwindigkeit hervorbringt. Ist nun durch eine Kraft eine Masse in Bewegung versetzt, so ist die bewegte Masse selbst im Stande, Druck oder Zug hervorzubringen. Sie bringt jedoch keinen todten, ruhenden Druck oder Zug hervor, sondern sie vermag auf jedem Punkte eines gewissen Weges Druck oder Zug auszuüben. Die bewegte Masse enthält also das, was dem ruhenden Druck oder Zug fehlt, um arbeitsfähig zu sein, die Bewegung verbunden mit Druck oder Zug. Die bewegte Masse enthält arbeitsfähige Kraft, die man deßhalb im Gegensatze zu dem wirkungslosen ruhenden Druck oder Zug lebendige Kraft nennt. Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist die Leistungsfähigkeit, welche die bewegte Masse durch ihre Bewegung enthält. Da die in der Technik angewandten Naturkräfte aus bewegten Massen bestehen, so ist es wichtig, die Größe der Leistungsfähigkeit einer bewegten Masse berechnen, die lebendige Kraft messen zu können; und da die neuere Physik alle arbeitsfähigen Kräfte als Massenbewegungen auffaßt, so ist auch hier das Messen der lebendigen Kraft einer Massenbewegung von wesentlicher Bedeutung.

Die lebendige Kraft einer bewegten Masse wird gemessen durch das halbe Product der Masse mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. $L = \frac{1}{2} mv^2$ . . . . (11)

Wenn eine vollkommen freie, ruhende Masse in Bewegung versetzt wird, so hat die wirksame Kraft nur die Trägheit der Masse zu überwinden, das passive Verharren der trägen Masse in ihrem Zustande. Hierbei tritt nicht, wie bei der schon besprochenen Arbeit, ein Widerstand, eine Gegenkraft von bestimmter Größe auf; denn jede Kraft, auch die kleinste, ist im Stande, die freie Masse zu bewegen, wobei allerdings die erzielte Geschwindigkeit der Kleinheit der Kraft entspricht. Da indessen für eine bestimmte Beschleunigung a der Masse m die Kraft ma nöthig ist, so könnte man nach dem Satze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" die Trägheit als einen Widerstand (vis inertiae) von der Größe ma auffassen, wofür auch der Versuch an Poggendorffs Fallmaschine spricht, da dort durch die Trägheit das Gewicht um den Betrag ma vermehrt oder vermindert wird.

Daß eine bewegte Masse Wirkungen ausüben kann, ist eine oft erwähnte und oft beobachtete Thatsache: ein geworfener Stein kann eine Fensterscheibe zersplittern, eine losgeschossene Kugel kann Bretter oder Mauern durchlöchern, ein Eisenbahnzug kann nach dem Dampfabschlusse sich selbst noch Kilometer weit fortziehen, der Wind ist nichts anderes als bewegte Luft. Demnach enthält eine bewegte Masse eine Leistungsfähigkeit. Diese besteht jedoch nicht in einem todten Drucke, wie ihn ein auf dem Boden liegendes Gewicht ausübt, sondern die bewegte Masse übt einen gewissen Druck auf jedem Punkte eines gewissen Weges aus; die Kugel zerstört die Festigkeit des Brettes in der ganzen Dicke desselben; der Eisenbahnzug überwindet die Widerstände auf jedem Punkte eines Kilometer langen Weges; ein Sturm trägt seine zerstörenden Wirkungen Meilen weit. Die Leistungsfähigkeit einer bewegten Masse ist demnach Druck oder Zug auf jedem Punkte eines gewissen Weges, die lebendige Kraft ist Arbeit.

Zum Beweise unseres Satzes (11) müssen wir demnach die lebendige Kraft messen, indem wir den in der bewegten Masse enthaltenen Druck mit dem Wege multipliciren. Der Druck einer bewegten Masse kann allerdings ein höchst verschiedener sein; wir wählen denjenigen aus, für welchen wir den entsprechenden Weg angeben können. Die Kraft, welche der Masse m unaufhörlich die Acceleration a ertheilt, ist nach Fl. (8) bekanntlich $= ma$; nach dem Princip „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" übt die Masse dabei fortwährend den Gegendruck ma aus, was auch Poggendorffs Fallmaschine beweist. Wenn aber eine Masse sich mit der Acceleration a bewegt, so legt sie nach Fl. (3) den Weg $\frac{1}{2} at^2$ zurück. Multipliciren wir diesen Weg mit jenem Drucke, so erhalten wir die Leistungsfähigkeit oder lebendige Kraft $L = ma \, . \, \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} m \, . \, a^2t^2 = \frac{1}{2} mv^2$, da at nach Fl. (2) nichts anderes als die Geschwindigkeit v ist; die lebendige Kraft ist also $L = \frac{1}{2} mv^2$.

Dieser Ausdruck gibt uns die Leistungsfähigkeit, die Wucht oder den Schwung, die Energie einer Bewegung in Meterkilogrammen an. Wenn die Kräfte der Natur aus Massenbewegungen bestehen, so ist diese Stärke der Bewegung, die lebendige Kraft, das wahre Maß der Kräfte. Wir sind durch dieses Maß demnach nicht nur näher an das Wesen der Kräfte herangetreten, sondern sind durch dasselbe auch in Stand gesetzt, sie in ihrer Wesenheit mathematischen Betrachtungen zu unterwerfen, und gelangen hiermit, wie es immer bei der Erkenntniß des Wesens eines Gegenstandes der Fall ist, zu Naturgesetzen, die wegen der Allverbreitung der Naturkräfte zu allgemeinen Grundgesetzen führen, welche das ganze Weltall im Großen und Kleinen betreffen.

30 **Erster Satz über die lebendige Kraft.** Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist gleich der Arbeit derjenigen Kraft, welche der Masse die Bewegung ertheilte.

Die Kraft, durch welche eine lebendige Kraft hervorgebracht wird, kann diese Leistung nicht im Ruhestande bewirken, ihr Träger muß vielmehr ebenfalls in Bewegung sein; denn die bewegte Masse würde, wenn der Träger der Kraft in Ruhe wäre, durch ihre Bewegung dem Sitze der Kraft ausweichen, wodurch die Wirkung derselben unmöglich würde. Man könnte zwar hiergegen einwenden, daß die Anziehung der Erde, die einen Stein zum Fallen bringt, hierbei nicht in Bewegung sei, sondern ihren ruhenden Sitz in der Erde habe; bei diesem Einwande würde man aber vergessen, daß der Ausdruck „Anziehung der Erde" nur ein Nothbehelf für unsere unvollkommene Einsicht in den Sachverhalt ist, und daß aller Wahrscheinlichkeit nach der Sitz der das Fallen bewirkenden Ursache nicht die Erde, sondern ein außerhalb der Erde nach derselben hin stoßend wirkendes Agens ist. Selbst aber auch, wenn man bei der Anziehung bleiben will, so ist doch nicht zu verkennen, daß die eigentlich treibende Fallkraft nicht eine isolirte Anziehung der Erde, sondern das aus der gegenseitigen Anziehung von Erde und Stein hervorgehende Gewicht des Steines ist, das doch offenbar

seinen Sitz im Steine hat und sich beim Fallen fortwährend nach der Erde zu bewegt; also ist auch hier, wie überall, der Träger der Kraft, welche eine Bewegung hervorbringt, in Bewegung begriffen. Die Massenbewegung, die lebendige Kraft, wird nur durch Arbeit bewirkt, und diese Arbeit wird gefunden, indem man die Kraft k mit dem Wege s multiplicirt. Die Kraft aber, welche der Masse m in der Zeit t die Geschwindigkeit v verschafft, ist nach Fl. (7) bekanntlich $k = mv / t$; der hierbei von dem Angriffspunkte der Kraft k zurückgelegte Weg ist $s = \frac{1}{2} at^2$. Das Product dieser beiden Gleichungen ist $ks = \frac{1}{2}(mv / t) . at^2 = \frac{1}{2} mv . at$. Da nun nach Fl. (2) $v = at$ ist, so ergibt sich $ks = \frac{1}{2} mv^2$; also ist die Arbeit ks der Kraft k, welche der Masse m die Geschwindigkeit v ertheilt, gleich der lebendigen Kraft dieser Masse.

In anderen Fällen, wo eine Kraft eine Gegenkraft, einen Widerstand überwindet, wird die von der Kraft producirte Arbeit durch den Widerstand aufgezehrt oder consumirt, die producirte Arbeit geht in die vom Widerstande consumirte Arbeit über; man darf aber nicht aus dem Ausdrucke „consumirt" schließen, daß die Arbeit hierbei verschwunden, vernichtet wäre. Sie bleibt vielmehr, wie wir später betrachten werden, vollkommen erhalten, ganz wie es in dem eben betrachteten Falle geschieht, bei welchem die Arbeit nur die Trägheit zu überwinden hat, und dabei in lebendige Kraft übergeht. Man kann sich indessen hier ebenfalls vorstellen, daß die von der Kraft producirte Arbeit von der trägen Masse consumirt worden und in einen gleichen Betrag von lebendiger Kraft dieser Masse verwandelt worden sei.

Nachweise für diesen Satz lassen sich aus den Fallerscheinungen gewinnen. Wenn eine 3fache Masse zu Boden fällt, so hat sie die 3fache lebendige Kraft; diese ist also in demselben Verhältnisse gewachsen, wie die den Fall bewirkende Arbeit ks, da die Kraft k, das Gewicht, in der 3fachen Masse auch 3 mal so groß ist. Wird die Geschwindigkeit eine 3fache, so wird die lebendige Kraft 9 mal so groß; sie ist also in demselben Maße gewachsen, wie die Arbeit ks; denn die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers ist nach Fl. (4) $= \sqrt{(2gs)}$, wird also nur dann die 3fache, wenn der Weg s neun mal so groß wird, wenn also die Arbeit ks die neunfache geworden ist.

Wirkt auf eine andere Masse m' die Kraft k' auf demselben Wege s, so erhält die Masse eine andere Geschwindigkeit v', und es gilt die Gl. $k's = \frac{1}{2} m'v'^2$. Durch Division der obigen Gl. durch diese entsteht die Proportion $ks : k's$ oder $k : k' = \frac{1}{2} mv^2 : \frac{1}{2} m'v'^2$. Wirken demnach auf einen Körper zwei Kräfte auf gleichen Wegen, so verhalten sich die Kräfte wie die erzeugten lebendigen Kräfte. Leibnitz wollte diesem Gedankengange gemäß die Kräfte überhaupt durch die von ihnen erzeugten lebendigen Kräfte gemessen haben. Descartes und seine Anhänger vertheidigten dagegen die Proportion $k : k' = mv : m'v'$. Diese gilt jedoch nur unter Voraussetzung gleicher Zeiten, da nur dann aus 2 Ausdrücken von der Form $k = mv / t$ die Größe t durch Division verschwindet. Es verhalten sich demnach 2 gleich lange wirkende Kräfte, z. B. 2 momentane Kräfte wie die betreffenden Producte mv; man nennt dieses Product die Größe oder Quantität der Bewegung, da offenbar um so mehr Bewegung vorhanden ist, je mehr Masse sich bewegt und je größer die Geschwindigkeit derselben ist. Wenn demnach Kräfte durch gleiche Zeiten wirken, so verhalten sich die Kräfte wie die erzeugten Quantitäten der Bewegung. Wenn z. B. Pulver in einer Kanone entzündet wird, so wirkt der Druck der Pulvergase mit gleicher Kraft auf die Kugel und die Kanone; es muß folglich mv in der Kanone mit Lafette ebenso groß sein wie in der Kugel, und daher die Geschwindigkeit der Kanone in demselben Maße hinter der der Kugel zurückbleiben, als ihre Masse größer ist als die Masse der Kugel. Daß das Geschütz ebenfalls eine Geschwindigkeit hat, erfährt jeder Schütze durch den Stoß des Kolbens und jeder Kanonier durch den Rückgang der Kanone. Dieses Beispiel weist besonders eindringlich darauf hin, daß wohl die Quantität der Bewegung oder auch der Druck durch mv gemessen werden kann, nicht aber die Wirkung, die Arbeit; denn die Arbeit der Kugel ist doch eine unvergleichlich größere als die der Kanone, obwohl in beiden dasselbe mv ist; die Arbeit in der Kugel ist ihre lebendige Kraft und diese ist in der Kugel in dem Maße bedeutender, als ihre Geschwindigkeit die der Kanone übersteigt, da sie nicht durch mv, sondern durch $\frac{1}{2} mv^2$ gemessen wird.

Wenn eine Kraft eine vollkommen freie Masse in Bewegung versetzt, und wenn, wie eben bewiesen, die lebendige Kraft der freien Masse gleich der Arbeit jener bewegenden Kraft ist, so kann diese lebendige Kraft dann vollkommen jene Arbeit ersetzen; sie bietet aber den vortheilhaften Unterschied gegen jene Arbeit dar, daß sie auf einmal, in einem Momente leisten kann, was jene Kraft während ihres längeren Weges, in längerer Zeit erst hervorbrachte. Man nennt daher die lebendige Kraft auch angesammelte Arbeit. Schieben wir z. B. einen leicht beweglichen Wagen auf einer glatten Bahn fort, so sammelt sich der Theil unserer Arbeit, der nicht zur Ueberwindung der Hindernisse verzehrt wird, in Form von lebendiger Kraft in dem Wagen an, und derselbe vermag dann einen anderen Wagen fortzustoßen. Die Arbeit des Dampfes in einem Bahnzuge, die nicht zur Ueberwindung

der Hindernisse verwendet wird, sondern zur Vergrößerung der Geschwindigkeit, sammelt sich nach und nach in demselben zu lebendiger Kraft, die dann im Stande ist, einen anderen Wagenzug zu zertrümmern, oder den eigenen Zug noch längere Zeit fortzuschleppen. Die Arbeit der Pulvergase sammelt sich im Gewehrlaufe in der Kugel als lebendige Kraft, die dann auf einmal eine mächtige Wirkung entwickeln kann. Bei einem fallenden Körper, z. B. bei einem Rammklotze, wird die Arbeit des Herabtreibens durch das Gewicht des Körpers selbst verrichtet; sie sammelt sich im Körper zu lebendiger Kraft, die dann beim Aufschlagen die ganze Arbeit auf einmal wirksam machen kann. Immer ist die lebendige Kraft gleich der ganzen Arbeit, die nöthig war, um dem Körper seine Bewegung zu verleihen, sie ist die angesammelte Arbeit. Wenn daher ein Motor, wie z. B. fallendes oder fließendes Wasser durch seine Massenbewegung wirksam ist, so kann seine Arbeit ebensowohl durch die Arbeit der Kraft, welche die Bewegung hervorbrachte, als durch die ihr gleiche lebendige Kraft der Bewegung, also ebensowohl durch ks wie durch $1/2\, mv^2$ gemessen werden. Fällt z. B. eine Wassermasse von 80^{kg} 100^m hoch herab, so ist bekanntlich nach der ersten Messungsart ihre Arbeit $ks = 8000^{mk}$. — Dieselbe Arbeit finden wir aber auch, wenn wir die lebendige Kraft der Masse aufsuchen; denn m ist in diesem Falle gleich $80/10 = 8$, und v ist nach Fl. (4) $= \sqrt{(2gs)}$, also $v^2 = 2gs = 2 . 10 . 100 = 2000$; daher ist die lebendige Kraft $1/2\, mv^2 = 1/2 . 8 . 2000 = 8000^{mk}$, nach beiden Methoden dasselbe Resultat. Man kann also die Arbeit jedes Motors, der durch seine Bewegung Arbeit zu leisten vermag, nach 2 Methoden bestimmen, vorausgesetzt, daß man seine Bewegung kennt. Noch schärfer erhellt dies aus dem zweiten Satze über die lebendige Kraft.

31 **Zweiter Satz über die lebendige Kraft.** Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist gleich der Arbeit, welche diese Masse leisten kann, wenn sie hierbei ihre Bewegung ganz verliert.

Die Thatsache, daß eine bewegte Masse Arbeit leistet, ist schon durch mancherlei Beispiele festgestellt. Sie leistet Arbeit, indem sie im Stande ist, gegen einen gewissen Widerstand k einen gleichen Gegendruck auszuüben und denselben auf einem gewissen Wege s zu überwinden; die hierbei geleistete Arbeit ist = ks. Indem sie der entgegenwirkenden Masse Bewegung mittheilt, verliert sie von ihrer eigenen Geschwindigkeit, bis dieselbe endlich = 0 ist. Welchen Betrag von Geschwindigkeit sie verliert, dies hängt von der Größe des Widerstandes k ab. Steht uns ein Beispiel zu Gebote, daß die Masse m durch irgend eine bestimmte Kraft in 1 Secunde eine bestimmte Geschwindigkeit verliert, so können wir auch den Verlust unserer Masse m durch die Kraft k auffinden. Ein solches Beispiel bietet die Erde, indem jede senkrecht aufsteigende Masse in jeder Secunde durch die Anziehung der Erde, welche durch das Gewicht p des Körpers gemessen wird, die Geschwindigkeit $g = 10^m$ verliert. Wenn eine Masse durch die Kraft p die Geschwindigkeit g in 1 Secunde verliert, so verliert sie durch die Kraft k in 1 Secunde die Geschwindigkeit $a = (g/p)\,k$, und in t Secunden die Geschwindigkeit $(g/p)\,kt$. Verstehen wir nun unter t die Zeit, in welcher unsere bewegte Masse ihre ganze Geschwindigkeit v verliert, so ist $v - (g/p)\,kt = 0$, woraus $k = pv/gt$. Dieser Ausdruck gibt die Größe des Druckes an, den unsere bewegte Masse in der ganzen Zeit t ausübt, während ihre Geschwindigkeit in jeder Secunde um einen bestimmten Betrag a abnimmt; sie hat während dieser Zeit eine verzögerte Bewegung, legt also bis zum Stillstande nach Formel (4) den Weg $s = v^2/2a$ zurück. Multipliciren wir den Druck k mit dem Wege s, so erhalten wir die Gleichung $ks = (pv/gt).(v^2/2a) = 1/2\,(p/g)\,(v^3/at)$. Da nun $p/g = m$ und $at = v$, so ist $ks = 1/2\, mv^2$.

Wenn eine bewegte Masse Arbeit leistet und ihre Geschwindigkeit nicht ganz verliert, so ist diesem Satze gemäß die geleistete Arbeit nur gleich der verschwundenen lebendigen Kraft.

Nachweise für den zweiten Satz lassen sich mancherlei auffinden. Wenn eine Kugel von 250^m Geschwindigkeit 3 Bretter durchbohrt, so durchlöchert eine gleiche Kugel von 500^m Geschwindigkeit 12 gleiche Bretter; hat aber die zweite Kugel dieselbe Geschwindigkeit, jedoch bei gleicher Größe das doppelte Gewicht wie die erste, so durchbohrt sie 6 Bretter; die geleistete Arbeit wächst also direct mit der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit. — Bewegt sich ein Körper senkrecht aufwärts, so leistet er Arbeit, indem er durch seine

lebendige Kraft sein Gewicht bis zu einer gewissen Höhe hebt. Ein doppelt so schwerer Körper hat die doppelte Masse, also auch die doppelte lebendige Kraft; er leistet aber auch die doppelte Arbeit, indem er das doppelte Gewicht zu gleicher Höhe treibt. Wie schon früher (in 16) erwähnt, ist die Steighöhe eines solchen Körpers $= c^2/2g$; ein senkrecht aufsteigender Körper von 10, 20, 30, 40^{m} Geschwindigkeit erreicht daher Höhen von 5, 20, 45, 80^{m}; der 2te, 3te, 4te Körper hat eine 2, 3, 4 mal so große Geschwindigkeit wie der erste, also eine 4, 9, 16fache lebendige Kraft, leistet aber auch die 4, 9, 16fache Arbeit, indem er sich selbst zu 4, 9, 16facher Höhe treibt. Auch hier finden wir, daß die geleistete Arbeit in geradem Verhältnisse mit der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, also mit der lebendigen Kraft wächst. Ja hier tritt die Gleichheit der von der lebendigen Kraft geleisteten Arbeit mit der lebendigen Kraft deutlich auf. Der erste Körper hat, wenn seine Masse $= m$, die lebendige Kraft $1/2\, m \,.\, 10^2 = 50\, m$; seine Arbeit ist, da er 5^{m} hoch steigt $= 5\, p$, wenn p sein Gewicht bedeutet; da aber $p = 10\, m$, so ist die Arbeit $= 50\, m$. Ebenso einfach ergibt sich die Gleichheit von lebendiger Kraft und Arbeit bei den übrigen Körpern.

Dieser Satz läßt leicht erkennen, daß eine und dieselbe bewegte Masse je nach dem Widerstande, der ihr begegnet, den verschiedensten Druck ausüben kann, natürlich auf verschiedenen Wegen. Ein Körper von 30^{kg} Gewicht und 4^{m} Geschwindigkeit hat eine lebendige Kraft $= 1/2 \,.\, 3 \,.\, 4^2 = 24^{mk}$, kann also eine Arbeit von 24^{mk} leisten, vermag folglich einen Druck auszuüben von 24^{kg} auf einem Wege von 1^{m}, oder von 12^{kg} auf 2^{m}, oder von 8^{kg} auf 3^{m}, oder von 6^{kg} auf 4^{m} u. s. w., aber auch 240^{kg} auf 1^{dm}, 2400^{kg} auf 1^{cm}, 24000^{kg} auf 1^{mm} u. s. w. Hierauf beruht die verhältnißmäßig gewaltige Wirkung, die eine bewegte Masse im Vergleiche zu ihrem ruhenden Gewichte ausüben kann. Eine Büchsenkugel von 20^{g} Gewicht kann vermöge ihres Gewichtes wohl allmälig durch eine weiche Masse sinken, bleibt aber ruhig auf einem festen Körper liegen, während sie mit einer Geschwindigkeit von 500^{m} eine lebendige Kraft von 250^{mk} enthält, also z. B. eine Festigkeit von 5000^{kg} auf einem Wege von 5^{cm} überwinden, tief in Holz, Stein eindringen, Knochen und noch tiefer Fleisch durchbohren kann. Mit dieser Eigenschaft der lebendigen Kraft verstehen wir die Wirkungen des Schießens, Schleuderns, Werfens, Stoßens u. s. w.; in allen solchen Vornahmen sammeln wir in einem Körper Arbeit in Form von lebendiger Kraft an und lassen dieselbe dann Festigkeiten oder andere große Widerstände überwinden. Ein geschwungener Life-preserver oder Todtschläger kann leicht eine Hirnschale zerschmettern, während ein Stockknopf viel weniger gefährlich wirkt, da in dem ersteren die lebendige Kraft wegen des größeren Gewichtes und daher auch der größeren Masse des Bleiknopfes 10 bis 20 mal so groß werden kann als im Stockknopfe. Wird aber ein Stein mit einer langen Schleuder oder ein Stockknopf von einem kräftigen Arme geschwungen, so kann er durch eine 3fache Geschwindigkeit schon eine 9fache lebendige Kraft erhalten und daher auch die Stirne eines Riesen durchdringen. Wie bedeutend der Unterschied zwischen der ruhenden und der bewegten Masse ist, tritt besonders deutlich hervor, wenn wir berechnen, wie groß das Gewicht sein müßte, das auf einen Nagel gelegt, diesen ebenso tief eintreibt, als ein Hammer von 1^{kg} Gewicht, der mit einer Geschwindigkeit von 10^{m} auftrifft und den Nagel 1^{mm} tief einschlägt. Die lebendige Kraft des Hammers ist $= 1/2 \,.\, 1/10 \,.\, 10^2 = 5^{mk}$; die durch sein Gewicht beim Eindringen geleistete Arbeit ist $1 \,.\, 1/1000 = 0{,}001^{mk}$; daher die ganze Arbeit des Hammers $= 5{,}001^{mk}$. Soll nun das unbekannte nur aufgelegte Gewicht x dieselbe Wirkung haben, so muß seine Arbeit $x \,.\, 0{,}001$ gleich der lebendigen Kraft des Hammers sein; also entsteht die Gleichung $x \,.\, 0{,}001 = 5{,}001$, woraus $x = 5001^{kg}$. Der geschwungene Hammer von 1^{kg} bringt also dieselbe Wirkung hervor, wie ein 5001 mal so großes aufgelegtes Gewicht. — Das Einrammen der Pfähle wäre durch ruhende Gewichte unmöglich, weil man dieselben weder auf- noch anbringen könnte, während dem mächtigen Drucke, welchen die lebendige Kraft des Rammklotzes ausüben kann, diese Arbeit leicht gelingt.

Die Thatsache, daß eine Arbeit, die keinen oder einen zu geringen Widerstand zu überwinden hat, sich als lebendige Kraft in leicht beweglichen Massen ansammelt, und daß diese lebendige Kraft dann wieder Arbeit leisten kann, hat eine wichtige Anwendung in den Schwungrädern der Dampf- und sonstigen Kraftmaschinen gefunden. Der Dampf kann, wie aus der späteren Betrachtung der Dampfmaschine erhellen wird, nicht ununterbrochen wirken und während seiner Wirkungszeit auch nicht gleichmäßig wirken; außerdem setzen die Werke, die von einer Dampfmaschine getrieben werden, derselben nicht immer einen gleichen Widerstand entgegen. Um die hieraus sich ergebenden Unregelmäßigkeiten des Ganges der Maschine zu beseitigen, ist an derselben ein Rad von großer Masse angebracht, dessen Hauptmasse in dem Schwungringe, dem äußeren Randtheile des Rades, weit von der Achse entfernt, sich befindet, welche deßhalb eine große Geschwindigkeit annehmen kann. In dieser Masse sammelt sich zur Zeit der kräftigeren Dampfwirkung und der geringeren Widerstände die Arbeit des Dampfes an, und erhält als lebendige Kraft zur Zeit der schwachen oder ganz aufhörenden Dampfwirkung den Gang der Maschine und führt sie über Zeiten größerer Widerstände hinaus.

Besonders wichtig ist der zweite Satz dadurch, daß mittels desselben alle Fragen gelöst werden können, die sich in der Technik über einen Motor darbieten, dessen Kraft in seiner Massenbewegung beruht; denn aus der Gleichung $\frac{1}{2}mv^2 = ks$ läßt sich immer eine der vier auftretenden Größen oder ihrer Verbindungen finden, wenn die übrigen bekannt sind. Durch Auflösung der Gleichung nach k ($k = \frac{1}{2}mv^2 / s$) läßt sich der Widerstand berechnen, den der Motor auf der Strecke s bezwingen, oder der Druck, den derselbe auf diesem Wege ausüben kann, oder der Widerstand, welcher im Stande ist, die lebendige Kraft auf diesem Wege aufzuzehren. Durch Auflösung der Gl. nach s ($s = \frac{1}{2}mv^2 / k$) ergibt sich der Weg, auf welchem die lebendige Kraft den Druck k ausübt oder den Widerstand k überwindet. Durch Auflösung nach v ($v = \sqrt{(2ks / m)}$ findet man die Geschw., die eine gegebene Masse besitzen muß, um einen verlangten Druck ausüben, einen bekannten Widerstand überwinden zu können. Am wichtigsten ist natürlich die directe Anwendung des Satzes zur Berechnung der Arbeit, die irgend ein aus bewegter Masse bestehender Motor leisten kann. In den Aufgaben zu diesem Abschnitte sind Beispiele dieser Art, deren Lösung wir dem Studirenden besonders empfehlen. Wegen der Wichtigkeit des Begriffes der lebendigen Kraft möge ein Beispiel ausführlicher betrachtet werden. Ein Eisenbahnzug läuft auf der Bahn noch eine gewisse Strecke fort, wenn der Dampfzufluß aufgehört hat; die lebendige Kraft überwindet also auf horizontaler Bahn die Widerstände der Reibung und der Luft, welche nach aller Erfahrung durchschnittlich $\frac{1}{200}$ des Gewichtes des Zuges betragen. Wiegt nun ein Zug 80^t, so ist bei 12^m Geschw. die lebendige Kraft desselben $= \frac{1}{2}(80\,000 / 10)\, 12^2$. Bezeichnen wir den gesuchten Weg, auf welchem diese lebendige Kraft den Widerstand $\frac{1}{200} . 80\,000$ überwinden kann, mit x, so ist die zu leistende Arbeit $= \frac{1}{200} . 80\,000\, x$. Da die lebendige Kraft des Zuges nach dem zweiten Satze gleich dieser Arbeit ist, so erhalten wir die Gleichung $\frac{1}{200} . 80\,000\, x = \frac{1}{2}(80\,000 / 10)\, 12^2$, woraus $x = 1440^m$. Ein Eisenbahnzug von 12^m Geschw. vermag also durch seine eigene lebendige Kraft noch 1440^m weit zu laufen, einerlei ob seine Masse groß oder klein ist.

Noch wichtiger als im practischen Leben ist der Begriff der lebendigen Kraft in der reinen Theorie der neueren Physik geworden, insbesondere zur Erkenntniß des Wesens der Kräfte. Zum Beweise hierfür möge eine Stelle aus Redtenbachers Principien der Mechanik dienen, die schon zu einer Zeit (1852) erschienen, als einige hervorragende Anwendungen jenes Begriffes noch nicht einmal durchgedrungen waren. „Einzig und allein durch diese Begriffe“, sagt Redtenbacher, „sind wahre, das innere Wesen der Erscheinungen berührende Erklärungen der Thatsachen möglich, indem alle Erscheinungen auf Wechselthätigkeiten der Körper und ihrer Theile beruhen, deren Größe nur allein vermittelst der Begriffe von Arbeit und von lebendiger Kraft verstanden werden kann. Es scheint sogar, daß durch diese Begriffe die Mechanik mit der Physiologie in einen engern Zusammenhang gebracht werden kann; denn es ist Thatsache, daß alle Einwirkungen auf unser Nervensystem nach lebendigen Kräften zu beurtheilen sind. Die Intensität aller Empfindungen richtet sich theils nach der specifischen Reizbarkeit des Nervensystems eines Individuums, theils nach der lebendigen Kraft, mit welcher auf die Nervensubstanz eingewirkt wird. Für ein bestimmtes Individuum ist die Intensität der Empfindung des Schalles der lebendigen Kraft des schwingenden Lufttheilchens, die Intensität der (strahlenden) Wärme und der Lichtempfindung der lebendigen Kraft des schwingenden Aetheratoms proportional, und diese Thatsachen scheinen sich auch sehr natürlich zu erklären, weil diese lebendigen Kräfte die Wirkungen ausdrücken, durch welche die Nervensubstanz gereizt wird.“ Die folgenden Abschnitte werden noch weitere Beweise für die Wichtigkeit des Begriffes der lebendigen Kraft bringen und zeigen, daß die lebendige Kraft der Grundbegriff der neueren Physik ist.

32 Aufg. 54. Ein Zug von 100^t (à 1000^{kg}) und 10^m Geschw. soll nach 400^m zur Ruhe kommen; welcher Widerstand muß durch das Bremsen erreicht werden? Aufl.: $k = 1250^{kg} = \frac{1}{80}$ der Last. — A. 55. Welche Geschwindigkeit verliert der Zug in jeder Sec. und wann kommt er zur Ruhe? Aufl.: Nach Fl. (8) ist $a = k / m = 1250 / 10\,000 = \frac{1}{8}{}^m$; daher $t = c / a = 80$ Sec. — A. 56. Ein Zug von 80^t und $\frac{1}{250}$ Widerstand kommt nach 1800^m zur Ruhe; welche Geschw. hatte derselbe? Aufl.: $v = 12^m$. — A. 57. Wie groß ist die lebendige Kraft eines 15^{cm}-Geschosses, das 20^{kg} wiegt? Aufl.: $250\,000^{mk}$. — A. 58. Wie groß ist der Druck im Geschützrohre, wenn dasselbe $2{,}5^m$ lang ist? Aufl.: $ks = 250\,000$; hieraus $k = 100\,000^{kg}$. — A. 59. Wie groß ist der Effect des Geschützes, wenn dasselbe alle 5 Min. losgeschossen wird? Aufl. $11\frac{1}{9}{}^e$. — A. 60. Durch einen Kanal fließt in jeder Sec. eine Wassermenge von 3^{cbm} (1^{cbm} Wasser wiegt 1000^{kg}) mit einer Geschw. von 2^m; wie groß ist die leb. Kft. und der Effect des Baches? Aufl.: $L = 600^{mk} = 8^e$. — A. 61. Aus einer Feuerspritze strömen per Sec. 10^l Wasser mit einer Geschw. von 20^m; wie hoch steigt es und welcher Effect ist nöthig? Aufl.: $s = c^2 / 2g = 20^m$; $E = \frac{1}{2}mv^2 = 200^{mk} = 2\frac{2}{3}{}^e$. — A. 62. Ein Wagen von 300^{kg} werde mit einer Geschw. von 2^m auf einer guten Straße fortgezogen; welcher Eff. ist nöthig? Aufl.: $E = 300 . \frac{1}{30} . 2 + \frac{1}{2} . 30 . 2^2$

$= 50^{mk}$. — Aufg. 63. Welcher Effect E ist beim Anlaufe des Eisenbahnzuges in A. 56 zu leisten, und wie verhält sich derselbe zu dem nothwendigen Effect E im Beharrungszustande, wenn dieser in 1 Min. erreicht sein soll? Aufl.: $a = 12/60 = {}^1\!/_5{}^m$; $s = {}^1\!/_2 at^2 = 360^m$, $ks = {}^1\!/_{250} . 80\,000 . 360 = 115\,200^{mk}$; $L = {}^1\!/_2 mv^2 = 576\,000^{mk}$; $E = (115\,200 + 576\,000)/60 = 11520^{mk} = 153{,}6^e$; $E : E' = 3 : 1$. — A. 64. Den ersten Satz $ks = {}^1\!/_2 mv^2$ für den freien Fall zu beweisen? Aufl.: $k = p$; $p = mg$; $s = v^2/2g$; $ks = {}^1\!/_2 mv^2$. — A. 65. Wie groß ist die leb. Kraft zweier Massen m und m′, die sich mit der Geschw. c einander durch Anziehung nähern oder durch Abstoßung von einander entfernen? Aufl.: L von $m = {}^1\!/_2\, m'm^2c^2/(m + m')^2$, L von $m' = {}^1\!/_2\, mm'^2c^2(m + m')^2$; die Summe $= {}^1\!/_2 mm'c^2(m + m')$. — A. 66. Der Luftdruck vermag bei 0° C Quecksilber 75^{cm} hoch in einen luftleeren Raum zu drücken; nach der neueren Physik geschieht dies durch die lebendige Kraft der fortschreitenden Luftmoleküle. Wenn nun die Dichte der Luft der 10400te Theil von der des Quecksilbers ist, und wenn wir annehmen, daß $^1\!/_2$ der Luftmoleküle nach einer Richtung stoßend wirken, daß aber nach Clausius 37% dieser Moleküle in ihrer fortschreitenden Bewegung gehemmt werden, so fragt es sich, welche Geschw. die Moleküle haben müssen, um durch ihre leb. Kraft 75^{cm} Quecksilber heben zu können? Aufl.: ${}^1\!/_2 . {}^1\!/_2 . 0{,}63\, m . v^2 = {}^1\!/_2 . 10400 . 10m . 0{,}75$; hieraus $v = 500^m$ ca. — A. 67. Wenn die Dichte des Wasserstoffs der 14te Theil von der Luftdichte ist, und wenn angenommen wird, daß die Temperatur durch die leb. Kraft der Moleküle bedingt ist, wie groß ist dann die Geschw. der Wasserstoffmoleküle bei 0° C? Aufl.: ${}^1\!/_{14} . v^2 = 500^2$, woraus $v = 1871^m$ ca.

4. Eintheilung der arbeitsfähigen Kräfte in lebendige Kraft und Spannkraft, Energie der Bewegung und Energie der Lage. 33

In den letzten Abschnitten sind wir zu der Erkenntniß gelangt, daß die Arbeit, welche zur Bewegung einer Masse verwendet wird, sich in Form von lebendiger Kraft in dieser Masse ansammelt, sowie daß diese lebendige Kraft eine gleiche Arbeit leisten kann, daß also demnach jene Arbeit in einen gleichen Betrag lebendiger Kraft verwandelt worden, daß nicht der geringste Betrag derselben verschwunden, sondern daß sie vielmehr in Form von lebendiger Kraft ungeschwächt erhalten geblieben ist. Bei dieser Gelegenheit wurde schon die Frage angeregt, ob die Arbeit, welche einen Widerstand auf bestimmtem Wege überwindet, ein entgegengesetztes Verhalten zeige, ob sie hierbei wirklich consumirt, vernichtet werde, wie man z. B. vermuthen kann, wenn durch Arbeit unserer Muskelkraft Holz gesägt wird, da wir nach Vollbringen solcher Arbeit keine vorhandene lebendige Kraft wahrnehmen können. Mit dieser Frage hängt noch eine zweite Frage zusammen. Es wurde öfter erwähnt, daß der ruhende todte Druck keine Arbeit leiste, sondern erst arbeitsfähig werde, wenn mit ihm Bewegung verbunden sei; es stellt sich hier die Frage, ob denn aller ruhende Druck in gleicher Weise arbeitsunfähig sei, ob nicht vielmehr arbeitsunfähiger und arbeitsfähiger Druck unterschieden werden müsse. Hiermit hängt wieder eng die dritte Frage zusammen, ob wirklich alle arbeitsfähige Kraft lebendige Kraft, Massenbewegung sei. Unter Kraft wird in diesen Abschnitten nicht der todte Druck oder Zug, sondern Druck oder Zug in Bewegung, Massenbewegung, Arbeit verstanden; doch wollen wir, wo Irrthum entstehen könnte, arbeitsfähige Kraft statt Kraft in diesem Sinne sagen und statt des Wortes Kraft im gewöhnlichen Sinne die Ausdrücke Druck oder Zug gebrauchen. Alle diese Fragen sind durch folgende Sätze zu beantworten:

Wenn ein Körper Arbeit consumirt, indem an ihm ein Widerstand überwunden wird, so erfährt der Körper entweder als Ganzes oder in seinen Molekülen eine Lagenveränderung. In oder vermöge dieser Lagenveränderung äußert der Körper einen Druck, ein Bestreben, in die frühere Lage zurückzukehren; wird das Hinderniß, das diesem Drucke entgegensteht, beseitigt, wozu keine Arbeit nöthig ist, so kehrt der Körper mit jenem Drucke in die frühere Lage zurück und producirt hierbei dieselbe Arbeit, die er bei der ersten Lagenveränderung consumirte. Der veränderte Körper enthält daher die Fähigkeit, die consumirte Arbeit wieder zu produciren, er enthält arbeitsfähige Kraft in Form von consumirter Arbeit. Man nennt diese Fähigkeit, consumirte Arbeit wieder zu produciren, Spannkraft und mißt dieselbe durch die consumirte Arbeit. Lebendige Kraft und Spannkraft sind demnach arbeitsfähige Kräfte. Die lebendige Kraft ist Arbeit in Form von Massenbewegung, die Spannkraft ist Arbeit in einer Form, die uns noch nicht bekannt ist; wir sagen deßhalb, sie ist consumirte Arbeit. Die lebendige Kraft eines Körpers ist die Arbeit, welche er vermöge seiner Geschwindigkeit, und die Spannkraft ist die Arbeit,

welche er vermöge seiner Lage zu leisten befähigt ist. Die beiden arbeitsfähigen Kräfte stimmen darin überein, daß sie Arbeit leisten; man bezeichnet sie daher auch mit einem Namen, mit dem Worte Energie, und zwar die lebendige Kraft, da sie aus bewegter Masse besteht, mit dem Namen Energie der Bewegung, und die Spannkraft, da wir an ihren Trägern keine Bewegung, sondern nur eine Lagenveränderung wahrnehmen, mit dem Namen Energie der Lage. Diese allgemeinen Sätze müssen wir an möglichst vielen Beispielen zur Klarheit bringen.

Das einfachste und am vollständigsten durchführbare Beispiel ist das Heben eines Körpers. Wird ein Körper vom Gewichte p zur Höhe h gehoben, so ist dafür die Arbeit ph nöthig, der Körper hat die Arbeit ph consumirt. Legen wir denselben nun in der Höhe h auf ein Brett, so übt er auf dasselbe einen Druck aus gleich seinem Gewichte; denselben Druck übt er allerdings auch auf den Erdboden aus, wenn er auf demselben liegt; aber wirthschaftlich unterscheidet sich der erstere Druck von dem letzteren; vermöge des letzteren kann niemals etwas geleistet werden, er ist ein todter Druck; vermöge des ersteren kann dagegen Arbeit vollbracht werden; denn nehmen wir die Unterstützung weg, wofür keine Arbeit nöthig ist, so fällt der Körper, es sammelt sich in ihm die Arbeit seines Gewichtes zu immer wachsender lebendiger Kraft. Die lebendige Kraft, die er bei seiner Ankunft an dem Boden enthält, $L = \frac{1}{2} mv^2$, ist nun genau gleich der Arbeit ph, die zu seinem Heben nöthig war; denn $\frac{1}{2} mv^2$ läßt sich auch in der Gestalt $mg.(v^2/2g)$ schreiben; mg ist aber das Gewicht p des Körpers und $v^2/2g$ ist die Höhe, welche er herabgefallen ist; also ist $\frac{1}{2} mv^2 = ph$; die lebendige Kraft, die der gehobene Körper entwickeln kann, ist gleich der consumirten Arbeit. Der gehobene Körper unterscheidet sich also von dem auf dem Boden liegenden dadurch, daß er die consumirte Arbeit produciren kann, er enthält die Fähigkeit, die consumirte Arbeit zu produciren, er enthält Spannkraft oder Energie der Lage = ph, während der am Boden liegende Körper wohl einen Druck entwickelt, aber keine Energie. Der Druck des gehobenen Körpers ist ein arbeitsfähiger Druck, der des zu Boden liegenden Körpers ist ein todter Druck. Warum der erstere Körper arbeitsfähig ist, wie er die consumirte Arbeit enthält, ist uns unbekannt; es ist durchaus nicht ausreichend zur Erklärung, wenn man, wie Mayer, angibt, er enthält die Arbeit, weil er sie consumirt hat; gewöhnlich schreibt man die Ursache der Anziehung zwischen dem Körper und der Erde zu; allein einerseits ist die Anziehung auf den gehobenen Körper dieselbe wie auf den Körper am Boden, erklärt also diesen Unterschied nicht, und andererseits ist die Anziehung selbst nicht erklärt; aller Wahrscheinlichkeit nach beruht die Wirkung auf einem außerhalb der Erde wirksamen Agens, welchem durch das Heben eine erhöhte lebendige Kraft mitgetheilt wurde, und das vermöge derselben den gehobenen Körper zurück treibt, ihm die lebendige Kraft mittheilt; hiermit wären wir auch an der Möglichkeit angelangt, auch die Spannkraft, den arbeitsfähigen Druck des gehobenen Körpers als lebendige Kraft zu erklären. Wie sich dies auch verhalten möge, — und der eigentliche Sachverhalt ist hier unwesentlich, — soviel steht fest, daß der gehobene Körper eine Energie der Lage, eine Spannkraft gleich der consumirten Arbeit enthält, die ihn befähigt, eine gleiche lebendige Kraft zu entwickeln. Um zu zeigen, wie zahlreiche Verwendungen diese Spannkraft hat, braucht nur an das Wasser erinnert zu werden, das in Form von Dampf in die Luft aufsteigt, als Regen und Schnee wieder herabfällt, mittels der Wasserräder zahlreiche Arbeiten verrichtet, Schiffe trägt und die Gebirge allmälig zerstört, um sie als neue Erdschichten im Meere abzusetzen. Ein hoch gelegener See ist ein Reservoir mit Spannkraft erfüllt; denn er kann durch Oeffnen der Schleußen Mühlen treiben und die Maschinen von Fabriken aller Art in Arbeit versetzen.

Dieselbe Erscheinung, das Auftreten einer Spannkraft oder Energie der Lage, die wir bei der Veränderung der Lage eines Körpers beobachten, nehmen wir auch bei der Veränderung der Lage seiner Moleküle wahr. Wenn die Sehne eines Bogens gespannt wird, so hat sie die Fähigkeit, den Pfeil fortzuschleudern; die Arbeit des Spannens hat sich in Spannkraft der Sehne verwandelt. Wenn wir die Feder einer Uhr durch Arbeit unserer Muskeln mehr zusammenwinden, so verwandelt sich unsere Arbeit in die Spannkraft der Feder, die dann den Gang der Uhr bewirkt; hier entspricht der Ausdruck Spannkraft auch dem gewöhnlichen Sprachgebrauche. Ueberhaupt, wenn wir irgend einen Körper zusammendrücken, ausdehnen oder verwinden, so erfahren die Moleküle eine Verschiebung: sie haben dann das Bestreben, in die frühere Lage zurückzukehren und die Gestalt des Körpers wieder herzustellen; unsere Arbeit hat sich in eine Spannkraft verwandelt, für deren Druck seit langer Zeit der Name Elasticität oder Federkraft gebräuchlich ist. Die Erklärung dieser Thatsachen läßt noch Manches zu wünschen übrig. Wenn durch die consumirte Arbeit die Moleküle von einander entfernt werden, so nimmt man auch hier, wie bei dem gehobenen Körper, die

unerklärte Anziehung zu Hilfe, und erklärt durch dieselbe ihre Rückkehr. Mehr Befriedigung gewährt die Erklärung für den Fall, daß die Moleküle einander genähert werden. Moleküle können sich nur dann einander nähern, wenn ein Druck auf sie ausgeübt wird, der in stoßender Weise wirkt; hierdurch wird den Molekülen Arbeit mitgetheilt, ihre Bewegung wird vermehrt, sie stoßen dann mit größerer Geschwindigkeit gegen die folgenden Moleküle, kehren mit größerer Geschwindigkeit um und können dann in die alte Lage zurückkommen. Eine weiter hier auftretende Frage ist die, was aus der durch die Spannkraft erzeugten lebendigen Kraft wird, mit welcher die Moleküle in ihrer früheren Lage ankommen. In dem vorigen Beispiele, betreffend den fallenden Körper, kann mit der lebendigen Kraft des fallenden Körpers die mannigfachste Arbeit vorgenommen werden; in den eben betrachteten Beispielen befördert die lebendige Kraft der Sehne den Pfeil, die der aufrollenden Feder treibt die Uhr. Wenn aber die Theilchen eines elastischen Körpers zurückkehren, ohne ihre lebendige Kraft für irgend eine Arbeit abzugeben, so gehen sie nach dem Gesetze der Trägheit über ihre ursprüngliche Lage hinaus, werden dann von entgegen stehenden Theilchen zurückgeworfen oder von anderen hinter ihnen liegenden Theilchen zurückgezogen; sie kommen dann abermals in ihre ursprüngliche Lage zurück, wo sie wieder dasselbe Schicksal haben; sie gerathen also hierdurch in Schwingungen; die Schwingungen der Körpermoleküle aber bilden die Wärme. Die aus der Spannkraft hervorgehende lebendige Kraft ist also in diesen Fällen Wärme.

Es gibt indeß auch Körper, welche Spannkraft enthalten, ohne daß sie Arbeit consumirt zu haben scheinen, wie z. B. ein auf einem Brette über einer Schachtmündung liegender Stein, der nach Wegnahme des Brettes durch Hinabstürzen lebendige Kraft entwickelt, also Spannkraft enthält, oder eine Bergschicht, welche nach dem allmäligen Unterwaschen tieferer Schichten sich in Bewegung versetzt und Bergstürze verursacht (Goldau, Caub), oder eine Erdschicht, welche nach dem Auflockern tieferer Schichten durch Sickerung einstürzt und so die Art von Erdbeben erzeugt, die man Einsturzbeben nennt. In solchen Fällen ist der Körper an die Stelle solcher Körper getreten, die Arbeit consumirt haben, wie z. B. der auf dem Schachtbrett ruhende Stein an die Stelle der Körper, die um den Schacht zu bilden, aus der Tiefe gehoben werden mußten. Oder der Körper ist schon in der Vergangenheit gehoben worden, wie die Bergschichten über die Erdoberfläche u. s. w.

Damit eine Spannkraft wirksam werde, muß in den meisten Fällen ein Hinderniß beseitigt werden, wie bei dem betrachteten Steine das Brett, es muß, wie man sagt, eine Auslösung der Spannkraft stattfinden.

Ein besonders interessantes Beispiel von Spannkraft bieten uns die Pflanzen. Die Luft wird bekanntlich durch die zahlreichen Verbrennungen des gewöhnlichen Lebens, durch die Fäulniß organischer Stoffe und die Athmung fortwährend von Kohlensäure (Kohlendioxyd CO_2) durchdrungen, deren starke Anhäufung die Luft bald für das Leben gefährlich machen würde. Die Pflanzen beseitigen diese Gefahr und ernähren sich, indem an ihrer Oberfläche durch die lebendige Kraft oder Arbeit der Sonnenstrahlen der Kohlenstoff von dem Sauerstoff des Kohlendioxyds getrennt und in die Pflanzen aufgenommen wird, während der Sauerstoff in die Atmosphäre zurückkehrt. Durch die Arbeit der Sonnenstrahlen wird also die Anziehung der beiden Elemente überwunden, der Kohlenstoff in den Pflanzen und der Sauerstoff in der Luft angehäuft. Kohlenstoff und Sauerstoff haben folglich eine Arbeit consumirt und enthalten daher eine Spannkraft, die wir in diesen und zahlreichen ähnlichen Fällen chemische Verwandtschaft nennen; vermöge dieser Spannkraft können sich diese Elemente wieder verbinden, der Kohlenstoff kann verbrennen und hierdurch Wärme d. i. lebendige Kraft erzeugen. Also auch hier ist in Folge consumirter Arbeit eine Fähigkeit vorhanden, lebendige Kraft zu entwickeln, jene Fähigkeit, die eben Spannkraft oder Energie der Lage genannt wird.

Wenn wir einen Glasstab mit einem Kautschuklappen reiben, so wird der Glasstab positiv und der Lappen negativ elektrisch; die beiden Elektricitäten ziehen einander an, haben das Bestreben, sich zu vereinigen, was man beobachten kann, wenn man den Glasstab an einen Seidenfaden hängt und den Kautschuklappen in seine Nähe bringt; der Glasstab bewegt sich dann zu dem Lappen hin. Hier ist also die Arbeit der Reibung in eine Spannkraft übergegangen, die wir elektrische Anziehung nennen, und welche im Stande ist, lebendige Kraft zu erzeugen; dies geht schon aus der Annäherung des Glasstabes hervor; kommen die beiden Körper einander noch näher, so springt ein Funke über; es entsteht also dann Wärme, eine lebendige Kraft. In dieser Weise bringt jede consumirte Arbeit die Fähigkeit hervor, lebendige Kraft von gleichem Betrage zu erzeugen, sie entwickelt eine Spannkraft, eine Energie der Lage von gleicher Größe. Hierdurch wird die Nothwendigkeit nahe gelegt, den Zusammenhang zwischen Arbeit und lebendiger Kraft noch in weiteren Consequenzen zu untersuchen, insbesondere, da wir bisher immer nur von einem Körper gesprochen haben, in Bezug auf eine Verbindung von Körpern, ein Massensystem.

34 Die Erhaltung der lebendigen Kraft (Huyghens 1673, Joh. Bernoulli 1703). Wenn ein in Bewegung befindliches Massensystem, das also schon eine gewisse leb. Kr. in sich trägt, keine Einwirkung erfährt, so bleibt seine lebendige Kraft ungeändert, sie bleibt erhalten, weil seine Masse unverändert bleibt, und weil die Geschwindigkeit sich nur durch eine Einwirkung ändern könnte. Wenn es aber eine Einwirkung erfährt, und demnach Arbeit consumirt, ohne jedoch seine Lage gegen die Erde oder die Lage der Massen gegen einander zu ändern, so entsteht keine Spannkraft, sondern die ganze consumirte Arbeit wird in lebendige Kraft umgewandelt; es wird folglich die lebendige Kraft des Systems vermehrt, und zwar um den Betrag $\frac{1}{2} mv^2$, der nach dem ersten Satze der Arbeit ks gleich ist. Wenn alsdann das Massensystem auf andere Körper einwirkt und an diesen durch seine lebendige Kraft eine gewisse Arbeit $k_1 s_1$ producirt, so verliert es nach dem zweiten Satze einen der Arbeit $k_1 s_1$ gleichen Betrag $\frac{1}{2} mv_1{}^2$ von lebendiger Kraft. Wir haben folglich die 2 Gleichungen $ks = \frac{1}{2} mv^2$ und $k_1 s_1 = \frac{1}{2} mv_1{}^2$. Subtraction derselben ergibt $ks - k_1 s_1 = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_1{}^2$, d. h. der Zuwachs eines Massensystems an lebendiger Kraft ist gleich der Differenz zwischen der verzehrten und der geleisteten Arbeit. Ist die verzehrte Arbeit so groß wie die geleistete, also die Differenz der beiden $= 0$, so ist auch $\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_1{}^2 = 0$, also der Zuwachs an lebendiger Kraft $= 0$. Indessen kann jetzt die Vertheilung der lebendigen Kraft eine andere sein als vor dem Stattfinden der beiden Arbeiten. Denn bei dem Consumiren der ersten Arbeit kann die entstandene lebendige Kraft auf andere Massentheile gekommen sein, als diejenigen sind, welche zum Produciren der zweiten Arbeit ihre lebendige Kraft ganz oder theilweise verloren haben; es kann z. B. bei dem Consumiren Arbeit der Moleküle entstanden sein, während bei dem Produciren Arbeit der Atome verloren wurde. Hieraus folgt der Satz: *Wenn ein bewegtes Massensystem solche Veränderungen erfahren hat, durch welche weder ein Ueberschuß gewonnener noch ein Ueberschuß verzehrter Arbeit entsteht, so ist die Summe der lebendigen Kräfte des ganzen Systems dieselbe geblieben, oder sie ist eine constante Größe.* Man nennt diese Wahrheit den Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft.

Wenn die beiden Arbeiten von inneren Kräften herrühren, und wenn bei der Einwirkung dieser Kräfte alle Körpertheilchen wieder in ihre ursprüngliche Lage gegen einander oder gegen ein festes Centrum gelangt sind, so sind die beiden Arbeiten offenbar einander gleich; folglich gilt auch dann die Beständigkeit der lebendigen Kräfte; daher spricht *Helmholtz* (1847) den Satz folgendermaßen aus: Wenn sich eine beliebige Anzahl von beweglichen Massenpunkten nur unter dem Einflusse solcher Kräfte bewegt, welche sie selbst gegen einander ausüben, oder welche gegen feste Centren gerichtet sind, so ist die Summe der lebendigen Kräfte aller zusammen genommen zu allen Zeitpunkten dieselbe, in welchen alle Punkte dieselben relativen Lagen gegen einander und gegen die etwa vorhandenen festen Centren einnehmen, wie auch ihre Bahnen und Geschwindigkeiten in der Zwischenzeit gewesen sein mögen.

Ein einfaches Beispiel für das Princip der Erhaltung der lebendigen Kraft bietet der Bahnzug im Beharrungszustande: Die vom Dampfe producirte Arbeit ist dabei immer gleich der von den Widerständen consumirten Arbeit; die Geschw. und daher die leb. Kraft des Zuges bleibt immer dieselbe. Die Helmholtz'sche Form des Gesetzes wird durch die Weltkörper dargestellt. Ein Komet z. B. hat in der Sonnennähe eine sehr große Geschw. und daher eine große leb. Kft.; auf seiner gestreckten elliptischen Bahn entfernt er sich von der Sonne, seine leb. Kft. leistet die Arbeit, diese Anziehung zu überwinden, wodurch die leb. Kft. theilweise verbraucht, in Spannkraft umgewandelt und die Geschw. vermindert wird. In der Sonnenferne ist die Geschw. wie die lebendige Kraft am kleinsten, die Spannkraft am größten. Vermöge derselben kehrt der Komet mit wachsender Geschw. und steigender lebendigen Kraft in die Sonnennähe zurück, wo er die anfängliche Geschw. wieder angenommen hat und dadurch in der anfänglichen Lage auch wieder die anfängliche lebendige Kraft besitzt.

5. Zusammenhang der arbeitsfähigen Kräfte: Das Princip von der Erhaltung der Kraft (Mayer 1842, Helmholtz 1847). 35

Das Princip von der Erhaltung der Kraft ist eine Verbindung des Satzes von der Erhaltung der lebendigen Kraft mit den zwei Sätzen über die lebendige Kraft und mit dem Gesetze der Spannkraft. Nach dem ersten Satze bleibt die lebendige Kraft eines Massensystems dieselbe, wenn jeder von demselben consumirten Arbeit ein gleicher Betrag von producirter Arbeit gegenüber steht, bleibt also auch dieselbe, wenn der consumirten Arbeit Null die producirte Arbeit Null gegenüber steht. Bei dem System aller Massen, bei dem Massensystem des Weltalls ist jedenfalls die nach außen producirte Arbeit gleich Null, sowie auch die von außen consumirte Arbeit gleich Null, weil außerhalb dieses Massensystems keine Massen mehr vorhanden sind. Demnach müßte der Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft für das Weltall gelten, wenn nicht innerhalb desselben durch lebendige Kraft Arbeit geleistet oder durch Arbeit lebendige Kraft erzeugt würde. Es ist deßhalb zu untersuchen, welche Aenderung der Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft hierdurch erfährt.

Wenn durch lebendige Kraft Arbeit geleistet wird, so ist diese Arbeit nach dem zweiten Satze über die lebendige Kraft genau so groß, wie die lebendige Kraft, und nach dem Gesetze über die Spannkraft ist diese Arbeit in dem Körper, der sie consumirt hat, in ungeändertem Betrage noch vorhanden. Die Zahl der Meterkilogramme ist also dieselbe geblieben; nur ist an die Stelle einer lebendigen Kraft eine gleich große Spannkraft getreten. Und wenn durch eine solche Spannkraft lebendige Kraft entsteht, so ist nach dem ersten Satze über die lebendige Kraft jene Arbeit oder Spannkraft gleich dieser lebendigen Kraft; auch jetzt ist die Zahl der Meterkilogramme dieselbe geblieben; nur ist an die Stelle einer Spannkraft eine gleich große lebendige Kraft getreten. Im Weltall ist also nicht die lebendige Kraft constant, wohl aber die Anzahl der Meterkilogramme, die theils in Gestalt von lebendiger Kraft, theils in Gestalt von Spannkraft vorhanden ist:

Die Summe der lebendigen Kräfte und der Spannkräfte ist constant.

Man nennt diesen Satz das Princip von der Erhaltung der Kraft. In dieser Form wurde er zuerst von Helmholtz 1847 ausgesprochen und mathematisch bewiesen. Wie bereits erwähnt, nennt man die lebendige Kraft auch Energie der Bewegung und die Spannkraft Energie der Lage; diese Benennung hat den Vortheil, daß man die Summe der lebendigen Kräfte und der Spannkräfte mit dem einfachen Ausdrucke Energie bezeichnen kann. Wendet man diese Bezeichnung an, so nimmt das Gesetz die von Clausius 1865 zuerst ausgesprochene Gestalt an:

Die Energie des Weltalls ist constant.

Robert Mayer aus Heilbronn sprach das Gesetz schon 1842 in folgender Form aus: Kräfte sind unzerstörliche, wandelbare, imponderable Objecte. Auch folgerte er damals schon aus diesem Grundgedanken die Aequivalenz von Wärme und Arbeit und berechnete annähernd das mechanische Aequivalent der Wärme.

Einen Nachweis für dieses Gesetz bieten uns die Erscheinungen des freien Falles. Wenn wir einen Körper von 20^{kg} mit einer Geschw. von 50^m senkrecht aufwärts schießen, so ist seine leb. Krft. $\frac{1}{2}mv^2 = 2500^{mk}$. Vermöge derselben leistet er die Arbeit, sein eigenes Gewicht von 20^{kg} auf die Höhe $v^2/2g = 125^m$ hoch zu heben, consumirt also die Arbeit $20 . 125 = 2500^{mk}$, wodurch er in dieser Höhe zur Ruhe gelangend die Spannkraft 2500^{mk} enthält; dies wird, wie bekannt, dadurch nachgewiesen, daß er im Stande ist, vermöge dieser Spannkraft die Höhe von 125^m wieder herabzufallen, hierdurch am Fuße dieser Bahn die Geschw. $\sqrt{(2gs)} = 50^m$ anzunehmen und so die lebend. Kraft von $\frac{1}{2}(20/10) 50^2$

$= 2500^{mk}$ wieder zu erzeugen; oder was dasselbe ist, auch dadurch, daß er im Stande ist, sein eigenes Gewicht von 20^{kg} durch einen Weg von 125^{m} herabzutreiben und somit eine Arbeit von $20 . 125 = 2500^{mk}$ zu produciren. Im Beginne des Niederfallens enthält also der Körper die Spannkraft 2500^{mk} und keine leb. Krft. — Untersuchen wir, wie es nach 1 Sec. des Niederfallens mit ihm steht. Nach 1 Sec. hat er eine Geschw. von 10^{m} und demnach eine leb. Kft. von 100^{mk}. Der Weg, welchen er bis dahin zurückgelegt hat, ist $\frac{1}{2} gt^2 = 5^{m}$; folglich kann er sein Gewicht von 20^{kg} noch 120^{m} herabtreiben, enthält also noch eine Spannkraft von $20 . 120 = 2400^{mk}$; fügen wir hierzu seine leb. Kft. von 100^{mk}, so erfahren wir, daß die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft $= 2500^{mk}$ nach 1 Sec. des Fallens ebenso groß ist, als die Spannkraft am Anfange des Fallens. — Fassen wir nun seinen Zustand nach 2 Sec. des Fallens ins Auge. Der Körper hat dann die Geschw. $c = gt = 20^{m}$, also die leb. Kft. 400^{mk}. Der zurückgelegte Weg beträgt in diesem Zeitpunkte $s = \frac{1}{2} gt^2 = 20^{m}$; folglich vermag seine Spannkraft ihn noch 105^{m} abwärts zu treiben, beträgt daher $20 . 105 = 2100^{mk}$. Wieder ist die Summe der leb. Kft. 400^{mk} und der Spannkraft 2100^{mk} ebenso groß, wie am Beginne und nach 1 Sec. des Fallens, nämlich 2500^{mk}. Dasselbe Resultat erhalten wir für den Zeitpunkt nach 3 Sec. des Fallens; denn alsdann hat der Körper eine Geschw. $c = gt = 30^{m}$, also eine leb. Kft. von 900^{mk}; der zurückgelegte Weg beträgt in diesem Moment $s = \frac{1}{2} gt^2 = 45^{m}$; es bleibt ihm demnach noch ein Fallraum von 80^{m}, durch welchen ihn seine Spannkraft treibt, die folglich $= 20 . 80 = 1600^{mk}$ groß ist; auch hier ist die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft $= 900 + 1600 = 2500^{mk}$. Und wenn wir den Körper noch für den Endpunkt der 4ten Sec. verfolgen, finden wir in ihm dieselbe Energie. Nach 4 Sec. ist nämlich seine Geschw. $c = gt = 40^{m}$ und seine leb. Kft. $= 1600^{mk}$; seine Entfernung vom Ausgangspunkte erreicht jetzt $s = \frac{1}{2} gt^2 = 80^{m}$, so daß er noch 45^{m} durchfallen, also noch eine Arbeit von $45 . 20 = 900^{mk}$ leisten kann; fügen wir zu dieser Spannkraft von 900 die leb. Kft. von 1600^{mk}, so finden wir auch hier für seine Gesammtenergie den Betrag von 2500^{mk}. Wenn endlich der Körper 5 Sec. gefallen ist, so ist seine Geschw. $c = gt = 50^{m}$ und seine leb. Kft $= 2500^{mk}$; Spannkraft enthält er im Ganzen nicht mehr; denn sein Weg $s = \frac{1}{2} gt^2$ ist jetzt 125^{m}; er ist also auf dem Boden angelangt, kann keinen weiteren Weg zurücklegen, also keine Arbeit mehr leisten; die Summe von Spannkraft und leb. Kft. ist auch jetzt 2500^{mk}. So findet man, daß die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft des Körpers in jedem Zeitpunkte dieselbe bleibt, womit unser Gesetz nachgewiesen ist; allerdings nur für einen Körper, und zwar für den Fall, daß derselbe äußere Arbeit weder producirt noch consumirt; da indessen dieser Fall auch für das Weltall gilt, so kann man den Nachweis auch auf dieses System aller Massen ausdehnen.

In dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft darf man unter Kraft nicht einen todten Druck oder Zug, ja nicht einmal den arbeitsfähigen Druck oder Zug, der in jeder Spannkraft oder lebendigen Kraft enthalten ist, verstehen, sondern das, was eigentlich allein wahrhaft den Namen einer Kraft verdient, das Product von Druck oder Zug mit dem Wirkungsraume, die Arbeit selbst, die lebendige Kraft und die Spannkraft, in Meterkilogrammen, in Arbeitsmaß, ausgedrückt.

36 **6. Verwandlung der Naturkräfte.** Das Princip von der Erhaltung der Kraft, der Fundamentalsatz der neueren Naturbetrachtung, hat eine mannigfaltige Bedeutung. In diesem Satze liegt erstens ausgesprochen, daß alle lebendigen und alle Spannkräfte immer denselben Arbeitsbetrag ausmachen, daß also Arbeit oder arbeitsfähige Kraft weder vernichtet, noch aus nichts erzeugt werden kann; hiernach ist der Kraftvorrath der Natur ebenso unveränderlich, wie die Stoffmenge derselben; „das Naturganze enthält einen unerschöpflichen, unveränderlichen Kraftvorrath". Neben diesem Gedanken der Erhaltung der Kraft enthält das Princip zweitens den Gedanken der Einheit der Kraft; alle Kraft ist nach demselben Arbeit, Energie. Endlich enthält das Princip drittens den Gedanken der Wandelbarkeit der Kraft; alle Erscheinungen sind nach demselben nur Umwandlungen zwischen den verschiedenen Formen der Energie, Umwandlungen einer Art lebendiger Kraft in eine andere Art lebendiger Kraft, oder Umwandlungen von lebendiger Kraft in Spannkraft, oder Umwandlungen von Spannkraft in lebendige Kraft, oder endlich Umwandlungen einer Art von Spannkraft in eine andere Art von Spannkraft; und diese Umwandlungen geschehen immer in der Weise, daß der Arbeitsbetrag, die Zahl der Meterkilogramme, durch welche die lebendige Kraft oder Spannkraft gemessen wird, nach der Verwandlung ebenso

groß ist wie vor der Verwandlung. So mannigfaltig indessen die Arten der lebendigen Kraft und der Spannkraft oder der Energie auch sind, so lassen sie sich doch, was die Uebersicht erleichtert, in gewisse Abtheilungen bringen. Die Energie der Bewegung großer Massen, wie die Energie fallender Körper, der Weltkörper, der Eisenbahnzüge, des bewegten Wassers, der Winde u. s. w. fällt leicht ins Auge, wird daher *sichtbare Energie der Bewegung* genannt; die lebendige Kraft der kleinsten Theilchen dagegen entgeht als solche unserem Gesichtssinne; man nennt daher Wärme, Licht, Schall, den elektrischen Strom, den Magnetismus, die wohl alle aus Bewegungen der Moleküle bestehen, *unsichtbare Energie der Bewegung*, unsichtbare lebendige Kraft. Ebenso gebraucht man den Ausdruck *sichtbare Spannkraft*, sichtbare Energie der Lage für gehobene oder aus ihrer Lage gebrachte größere Massen; so enthält der Schnee der Gebirge, das Wasser der Höhen, wie auch das fließende Wasser sichtbare Energie der Lage, ebenso wie jeder gespannte elastische Körper, jede zusammengedrückte Luftmasse diese sichtbare Spannkraft darbietet. *Unsichtbare Energie* der Lage ist die chemische Verwandschaft und die Elektricität; Schießpulver, ein Steinkohlenlager, eine Gewitterwolke enthalten unsichtbare Spannkraft.

Bedauerlich ist trotz des bezeichnenden Namens der Energie, daß man in den deutschen Lehrbüchern nicht bei den älteren Bezeichnungen lebendige Kraft und Spannkraft geblieben ist, sondern von fremden Völkern, denen jene Namen fehlen, das Wort Energie mit zahlreichen verschiedenen Beiwörtern aufgenommen hat. So sagt man für lebendige Kraft nicht blos Energie der Bewegung, sondern auch wirkliche Energie und kinetische Energie und dynamische Energie, auch wirkliche Arbeit, und für Spannkraft nicht blos Energie der Lage, sondern auch mögliche Energie, potentielle Energie, sowie auch Arbeitsvorrath, Arbeitsvermögen, ruhende Arbeit. Im der Elektricitätslehre hat sich neuerdings für einen bestimmten Betrag potentieller Energie der Name *Potential* eingebürgert.

Es macht keine Schwierigkeit, aus dem Princip zu folgern, daß Kraft unmöglich vernichtet und ebenso unmöglich aus nichts erzeugt werden kann; es würde ja sonst der constante Gesammtbetrag fortwährend verändert werden, also nicht constant bleiben. Schwieriger ist es, diese Folgerung auch überall bewährt zu finden, da uns häufig genug Beispiele aufstoßen, wie beim Durchsägen von Holz oder beim Aufschlagen eines Körpers auf den Boden, wo die Arbeit oder die lebendige Kraft ganz verloren zu sein scheint. Hiermit stehen in engstem Zusammenhange die Verwandlungen der Energie, die Gestalten, welche dieselbe in den verschiedenen Fällen annimmt, und welche oftmals nur mit Schwierigkeiten zu verfolgen sind. Diese Schwierigkeiten sind nicht im Allgemeinen, sondern am besten an einzelnen Beispielen zu überwinden. Wir wollen daher eine Anzahl von Verwandlungen durchführen.

Der senkrecht in die Höhe geworfene Körper verwandelt seine sichtbare lebendige Kraft, die er im Beginne des Steigens besitzt, bis zum Aufhören des Steigens in eine gleiche sichtbare Spannkraft, und diese dann beim Fallen wieder in die gleiche sichtbare lebendige Kraft. Mit dieser lebendigen Kraft schlägt der Körper auf den Boden auf, überwindet dessen und seine Festigkeit, drückt die getroffenen Bodentheilchen in den Boden und seine treffenden Theilchen in sich selbst zurück. Durch diese Lagenänderung der Moleküle wird die lebendige Kraft des Körpers in Spannkraft verwandelt. Wäre der Körper absolut elastisch und die getroffene Bodenstelle ebenfalls absolut elastisch, so würden die Moleküle dieser Körper genau in die frühere Lage zurückkehren, wodurch sie ihre gesammte Spannkraft entwickeln würden und hierdurch dem gefallenen Körper dieselbe lebendige Kraft zurückgeben müßten, durch welche er dann wieder zur früheren Höhe steigen könnte; bei dem folgenden Fallen würde sich dieselbe Erscheinung wiederholen, und es würde dann ein ewiges Steigen und Fallen die Folge sein, das Perpetuum mobile, der ewige Umgang wäre erreicht. Leider gibt es aber keinen absolut elastischen Körper; die eingedrückten Theilchen kehren niemals vollkommen in ihre frühere Lage zurück, sie behalten einen Theil der Spannkraft und verwandeln denselben in unsichtbare lebendige Kraft, indem sie nach der Rückkehr von den jetzt näher liegenden Nachbartheilchen stärker angezogen werden, dann wieder rascher zurückkehren und so ihre Schwingungen vermehren, ihre Wärme erhöhen. Es wird also bei jedem Auffallen des Körpers ein Theil der sichtbaren lebendigen Kraft in unsichtbare, in Wärme verwandelt und hierdurch allmälig die gesammte sichtbare Energie des Körpers verzehrt. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse in den Maschinen; es wäre wohl eine Maschine denkbar, welche ununterbrochen lebendige Kraft in Spannkraft und diese wieder in lebendige Kraft umwandeln könnte;

und da die Arbeitsbeträge dieser Kräfte immer einander gleich sind, so könnte eine Maschine zu einem Perpetuum mobile werden, wenn es eben keine Hindernisse der Bewegung, keine Reibung gäbe. Diese Erscheinung tritt aber bei jeder Bewegung auf; die hervorragenden Theilchen eines bewegten Körpers fassen die hervorragenden Theilchen der denselben berührenden Körper, reißen sie ein wenig mit fort, lassen sie dann los und versetzen dieselben so in Schwingungen, durch welche ein Theil der sichtbaren lebendigen Kraft des bewegten Körpers in unsichtbare der Moleküle verwandelt wird; so wird allmälig die vorhandene lebendige Kraft aufgezehrt; das Perpetuum mobile ist unmöglich, weil die Reibung allmälig jede lebendige Kraft und jede Spannkraft sich berührender Körper in Schwingungen umwandelt. Anfänglich mögen es große und langsame Schwingungen sein, die den Schall bilden, der sich bei der Reibung verbreitet. Diese größeren und langsameren Schwingungen aller schallenden und tönenden Körper mögen sich wohl in die Erde fortpflanzen und dort mancherlei Arbeiten vollbringen, z. B. die geschichteten Steine in krystallinische umwandeln; jedoch müssen die weit ausgreifenden Theilchen auch auf einander schlagen, versetzen sich hierdurch in kleinere und schnellere Schwingungen, gehen also theilweise in Wärme über. Schließlich wird auf diese Weise die meiste Arbeit in Wärme umgewandelt, die in den kalten Weltraum hinausstrahlt; durch Nichtbeachtung dieses Vorganges entsteht der Schein, als ob Arbeit vernichtet werden könnte. Manche Schriftsteller sprechen die Meinung aus, die in den Weltraum hinausstrahlende Energie werde in dem unendlichen Raume zerstreut, es finde Dissipation der Energie statt, während andere vermuthen, die hinausgestrahlte Energie könne in gewissen Brennpunkten wieder vereinigt werden, es finde Reconcentration der Energie statt; auf diese Hypothesen kann hier nicht näher eingegangen werden.

Die Erzeugung von Wärme durch Reibung, welche unsere Streichhölzchen entzündet und die Wagenachsen bis zum Glühen erhitzt, die Entstehung von Wärme durch Stoß oder Schlag, vermittelst welcher ein kräftiger Schmied einen Nagel glühend hämmern kann, die Erzeugung von Wärme durch Zusammendrücken z. B. von Luft, welche im pneumatischen Feuerzeug, in dem Rammbär, in den Sternschnuppen und Feuerkugeln zur Wirkung kommt, ist eine Verwandlung von sichtbarer lebendiger Kraft in unsichtbare. Die bedentendste künstliche Wärmeqnelle aber, die Verbrennung, oder richtiger gesagt, die chemische Vereinigung, ist eine Verwandlung unsichtbarer Spannkraft, der chemischen Affinität, in unsichtbare lebendige Kraft, in Wärme. Wie schon erwähnt, entsteht die Spannkraft im Kohlenstoff der Pflanzen und im Sauerstoff der Luft durch die lebendige Kraft der Sonnenstrahlen oder der Aetherschwingungen, welche an den Pflanzen das Kohlendioxyd zersetzt, den Kohlenstoff in die Pflanzen und den Sauerstoff in die Luft führt; jeder Baum, noch mehr indeß jedes Steinkohlenlager ist also, einem Bergsee vergleichbar, ein Reservoir von unsichtbarer Spannkraft. Kommt ein Stück Kohle unter geeigneten Umständen mit Luft in Berührung, so stürzen die Sauerstoffmoleküle mit ihrer lebendigen Kraft auf das Kohlenstück los, vereinigen sich mit Kohlenstoffatomen, geben aber hierbei ihre lebendige Kraft großentheils an die Moleküle des Kohlenstückes ab, und erhitzen so dasselbe immer mehr und mehr. Geschieht dies unter dem Kessel einer Dampfmaschine, so geht die Wärme in das Wasser über, ihre lebendige Kraft verwandelt sich in die Spannkraft des Wasserdampfes, die einzige Spannkraft, die wir schon deutlich als lebendige Kraft erkannt haben. Durch die Dampfspannung wird eine Dampfmaschine und durch diese z. B. eine Anzahl von Arbeitsmaschinen einer Möbelfabrik getrieben; es entsteht also wieder lebendige Kraft. Die lebendige Kraft der Sägemaschine, der Hobel- und Bohrmaschine vollbringt Arbeit; aber hier scheinen wir an der Grenze der Verwandlungen angelangt, die Arbeit scheint verloren zu sein. Allein einerseits entsteht durch die Erschütterungen der Arbeitsmaschineu und ihre Reibung ein großer Betrag von Schwingungen, der schließlich in Wärme übergeht; andererseits wurde oben erwähnt, daß die Spannkraft des Kohlenstoffs nur unter geeigneten Umständen wirksam werden kann. Ein Steinkohlenlager, ein Baum erhitzen keinen Dampfkessel, sie müssen zerkleinert und transportirt werden, und erfordern eine um so größere Vorerhitzung zum Verbrennen, je größer die Stücke sind. Die Möbelfabrik dagegen erzeugt Hobelspäne, welche nach geringer Vorerhitzung schon ihre Wärme abgeben, sie erzeugt Säge- und Drehspäne, welche von selbst an der Luft verfaulen, d. i. langsam verbrennen und dadurch sich fast bis zur Selbstentzündung erhitzen, und sie erzeugt endlich Möbel, welche doch offenbar leichter verbrennlich sind als dicke Baumstämme. Schließlich entsteht auch hier wieder Wärme oder Vorbereitung zur Verbrennung, lebendige Kraft und Spannkraft.

Wie hier die Arbeit der Dampfmaschine der Spannkraft des Kohlenstoffs, also im Grunde der lebendigen Kraft der Sonnenstrahlen zu verdanken ist, so rührt fast alle Arbeit auf der Erde von der Sonnenwärme her. Nicht blos das Gedeihen der Pflanzen- und Thierwelt ist von der Sonne abhängig, sondern auch das weite Gebict der Technik, ja jede Bewegung im gewöhnlichen Leben bis zur menschlichen Thätigkeit hinauf, alles gewinnt seine Kraft aus der Sonne. Die Spannkraft des gehobenen Wassers in den Wolken, den Schnee-

gebirgen, den herabstürzenden und fließenden Wassermassen ist eine Arbeit der Sonnenstrahlen; der Wind, der in den Windmühlen und Segelschiffen Arbeit verrichtet, entsteht durch verschiedene Erwärmung der Luft von Seiten der Sonne; alle Maschinen, welche durch Wärme bewegt werden, von der Gasmaschine bis zur Locomotive, beruhen auf der Spannkraft des Kohlenstoffs, werden also im Grunde von Sonnenstrahlen umgetrieben; der elektrische Strom, der die Telegraphen und kleine Kraftmaschinen in Bewegung versetzt, entsteht durch Verbrennung des Zinkes, und dies Metall durch die Freiheit des Kohlenstoffs, also wieder durch den Sonnenschein; ebenso wird bei der Darstellung von Eisen und anderen Metallen, sowie von Phosphor aus den Knochen die Kohle verwendet, welche uns durch Sonnenarbeit geliefert wird. Ja selbst unsere eigene Thätigkeit scheint aus verwandelten Sonnenstrahlen zu bestehen; es ist bewiesen, daß der arbeitende Mensch mehr Kohlendioxyd ausscheidet als der müßige, sowie daß der thätige Muskel mehr Sauerstoff verzehrt als der unthätige; es scheint also unsere Kraft wie die Arbeit der Dampfmaschinen auf der Verbindung des Kohlenstoffs, den wir durch die Nahrungsmittel aufnehmen, mit dem Sauerstoff, den wir einathmen, zu beruhen, also auf der Freiheit des Kohlenstoffs vom Sauerstoff, welche von den Sonnenstrahlen herrührt. Man hat hiernach nicht mit Unrecht das ganze Erdenleben als eine Arbeit der Sonne bezeichnet, und den Unterschied zwischen Pflanzen und Thieren dahin festgestellt, daß die Pflanze lebendige Kraft in Spannkraft, das Thier Spannkraft in lebendige Kraft umwandelt.

Die Verwandlung von Wärme in Arbeit und von Arbeit in Wärme ist in der Wissenschaft und deren Geschichte besonders wichtig, weil der älteste Forscher auf diesem Gebiete, Mayer aus Heilbronn, der schon im Jahre 1842 das Princip von der Erhaltung der Kraft erkannt hat, auch damals schon eine Folgerung über die Wärme und eine Schätzung ihres Arbeitswerthes unternommen hat, aus der seitdem eine neue und fruchtbare Wissenschaft „die mechanische Wärmetheorie" hervorgegangen ist. Man schätzte nämlich die Wärme nach Wärmemaß, wie ja alles Messen ein Vergleichen mit einer Einheit derselben Art ist; man schätzt sie auch jetzt noch so, da man die lebendige Kraft der schwingenden Moleküle nicht direct messen kann; als Wärme-Einheit oder Calorie (1°) dient diejenige Wärmemenge, welche 1^{kg} Wasser um 1^{0} zu erwärmen vermag. Der Schluß Mayers über die Calorie war folgender: Wenn die Kräfte unzerstörlich aber wandelbar sind, so muß ein bestimmter Betrag der einen Kraft, nach ihrem Maße gemessen, sich immer in einen und denselben Betrag einer anderen Kraft, auch nach ihrem eigenen Maße gemessen, verwandeln, vorausgesetzt, daß bei der Verwandlung keine Arbeit nach außen geht; demnach muß eine Calorie, wenn sie Arbeit leistet, immer dieselbe Zahl von mk hervorbringen, und 1^{mk} Arbeit muß in Wärme verwandelt unter allen Umständen dieselbe Zahl von Calorien erzeugen. Diese Folgerung wurde durch zahlreiche, seitdem angestellte Versuche in allen Fällen bestätigt, und damit der entschiedenste Nachweis für die Richtigkeit des Princips geliefert. Wärme mag Arbeit auf die verschiedenste Weise bewirken, immer entsteht durch 1° eine Arbeit von 424^{mk}; und Arbeit mag Wärme durch Reibung, Stoß, Druck oder wie sonst möglich erzeugen, immer entsteht durch 1^{mk} Arbeit eine Wärme von $^{1}/_{424}$°. Die Zahl von 424^{mk}, welche man das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit nennt, und die Zahl $^{1}/_{424}$ Calorie, welche das thermische Aequivalent der Arbeitseinheit darstellt und mit A bezeichnet wird, sind die Grundzahlen der mechanischen Wärmetheorie; durch dieselbe wurde nicht nur die Anschauung befestigt, daß die Wärme eine Arbeit, eine Massenbewegung, eine Bewegung der Moleküle ist, sondern es wurden auch auf mathematischem Wege vorher unbekannte Erscheinungen und Zahlen für die Wärme aufgefunden, die sich bei angestellten Versuchen als richtig ergaben und dadurch eine werthvolle Bestätigung der Theorie lieferten. Durch ähnliche, auf mathematischem Wege durchgeführte Betrachtungen sucht man immer tiefer in das Wesen der Wärme und anderer Naturkräfte einzudringen; einige Beispiele mögen wenigstens eine Idee von dem dabei beobachteten Verfahren geben.

Wenn wir eine Glasstange reiben, so wird sie heiß und elektrisch; weil sie heiß wird, dehnt sie sich aus und schiebt darum die ringsum liegende Luftmenge etwas fort. Die mechanische Arbeit des reibenden Armes hat sich dabei verwandelt in: 1. Wärme, 2. Electricität, 3. größeres Volumen der Stange, 4. Fortschieben der Luft. Welche Arbeiten für die Wärme und das Fortschieben der Luft nöthig sind, läßt sich leicht berechnen; könnte man nun die zwei anderen Arbeiten auch noch finden oder durch unbekannte Größen ausdrücken, so müßte nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft die Summe der 4 consumirten Arbeiten gleich der von dem Arme producirten Arbeit sein. Hierdurch entstände eine Gleichung, durch deren Auflösung oder Verbindung mit anderen Gleichungen Schlüsse auf die Werthe der unbekannten Größen und dadurch auf die Eigenschaften der unerklärten Naturkräfte möglich werden könnten. Um die hierbei auftretenden Vorgänge einfach bezeichnen zu können, hat man sie eingetheilt; die Arbeit, welche zur Ueberwindung innerer Widerstände in Anspruch genommen wird, nennt man innere Arbeit; eine solche ist in

dem betrachteten Beispiele die Vergrößerung des Volumens, da für diese Veränderung die Moleküle eines Körpers weiter von einander entfernt werden müssen und daher ihre Anziehung gegen einander überwunden werden muß. Die Arbeit, welche zur Ueberwindung äußerer Widerstände verbraucht wird, heißt *äußere Arbeit*; eine solche ist in dem betrachteten Beispiele das Fortschieben der Luft, da hierbei der Luftdruck auf einem gewissen Wege überwunden werden muß. Zu der inneren Arbeit gehört wahrscheinlich auch das Erzeugen der Elektricität, da hierbei die zwei sich anziehenden und neutralisirenden Elektricitäten von einander getrennt werden müssen. Die Wärme-Erzeugung wird nicht zur inneren Arbeit gerechnet, sondern als Erhöhung der lebendigen Kraft der Moleküle aufgefaßt, wozu wohl Arbeit nöthig, aber nur die Trägheit, nicht aber eine innere Gegenkraft zu überwinden ist.

In diesem Beispiele wurden sämmtliche Kraftverrichtungen nach Arbeitsmaß gemessen. Es gibt aber auch Fälle, ja nach Clausius sind überhaupt alle Gleichungen fruchtbarer, wenn die Leistungen mit Wärmemaß gemessen, d. h. durch die ihnen gleichwerthige Wärme ausgedrückt werden, indem man einfach den Betrag ihrer Meterkilogramme mit $^1/_{424}$ oder A multiplicirt; dies ist besonders dann zu empfehlen, wenn, wie es sehr häufig geschieht, die Arbeiten durch Wärme vollbracht werden. Wird z. B. ein gewisser Betrag von Calorien in das Wasser eines Dampfkessels geleitet, so wird das Wasser durch einen Theil derselben erwärmt; durch einen anderen Theil wird innere Arbeit geleistet, die Moleküle werden weiter von einander entfernt, das Wasser hierdurch ausgedehnt und in Dampf verwandelt; endlich wird vielleicht eine sehr große äußere Arbeit geleistet, indem der Kolben eines Dampfcylinders von dem Dampfe fortgeschoben und hierdurch eine ganze Maschinenfabrik in Thätigkeit versetzt wird. Multipliciren wir diese äußere Arbeit mit A und addiren den so resultirenden Wärmebetrag der äußeren Arbeit zu der für die innere Arbeit und die Erwärmung verbrauchten Wärme, so muß diese Summe, vorausgesetzt, daß kein Wärmeverlust stattfindet, dem zugeführten Betrage von Calorien gleich sein, wodurch wieder eine der erwähnten fruchtbaren Gleichungen entsteht.

Auf diese Weise glaubt man sogar dem Verständnisse des inneren Wesens der Körper einen Schritt näher gekommen zu sein. Da jeder noch so kalte Körper nach aller Erfahrung immer noch kälter werden, also noch Wärme abgeben kann, so muß man annehmen, daß selbst die größte natürliche Kälte von — 63° und die größte künstliche Kälte von — 140°, die man beobachtet hat, immer noch Wärme ist, daß also die Moleküle immer noch in Bewegung sind, noch lebendige Kraft enthalten; und da sie noch in Bewegung sind, so können sie sich auch nicht unmittelbar berühren; es war daher auch Arbeit nöthig, um die sich anziehenden Moleküle in die vorhandene Entfernung von einander zu bringen; folglich enthalten die Moleküle auch Spannkraft, selbst bei jenen niedrigen Temperaturen. Indessen ist doch immerhin der Fall denkbar, daß die Moleküle eines Körpers vollkommen in Ruhe sind und sich unmittelbar berühren; da sie dann keine Spur von Wärme enthalten, so ist man berechtigt, jene nicht vorhandene, aber denkbare Temperatur den *absoluten Nullpunkt* zu nennen; wir werden später erkennen, daß derselbe 273° unter dem Gefrierpunkte des Wassers liegt. Bei jeder höheren Temperatur aber sind die Moleküle von einander entfernt, sie besitzen eine gewisse durchschnittliche Entfernung von einander, für welche Clausius den Namen *Disgregation* eingeführt hat; für diese Disgregation war eine gewisse Arbeit oder Wärme nöthig; die Moleküle enthalten demnach Spannkraft oder Energie der Lage; außerdem aber sind die Moleküle auch in Bewegung, wodurch sie die Temperatur des Körpers bilden; sie enthalten also auch Energie der Bewegung oder lebendige Kraft. Da man nun die Summe der lebendigen Kraft und der Spannkraft eines Körpers die Energie des Körpers nennt, so kann man den Satz aussprechen: Jeder Körper enthält unsichtbare Energie. Die Energie eines Körpers kann verändert werden, indem demselben Wärme oder Arbeit zugeführt, oder indem von ihm Wärme oder Arbeit abgegeben wird. Wenn es nun gelingt, die einem Körper zugeführte Wärme oder Arbeit zu zerlegen in einen Betrag, der die Temperatur oder lebendige Kraft oder Energie der Bewegung des Körpers erhöht hat, und in einen zweiten Betrag, der die Disgregation vermehrt, also die Spannkraft oder Energie der Lage erhöht hat, so ist hieraus auch wohl ein Schluß auf die schon vorher in ihm vorhanden gewesene lebendige Kraft und Spannkraft, und demnach auf seine Energie möglich, wodurch man dem Verständnisse seines Wesens näher kommen kann.

---

2. Allgemeine Eigenschaften.

Allgemeine Eigenschaften sind solche Eigenschaften, die allen Körpern ohne Ausnahme zukommen. Man unterscheidet sie in wesentliche oder nothwendige und in unwesentliche oder zufällige. Wesentliche Eigenschaften sind solche, ohne welche ein Körper nicht gedacht werden kann. Dieselben folgen aus dem Begriff der Materie, welche wir als das Raumerfüllende definirt haben. Darin liegt zuerst, daß ein Körper einen Raum einnimmt: die Ausdehnung, und sodann, daß der Körper diesen Raum auch ganz in Anspruch nimmt, ohne eine andere Verwendung desselben möglich zu lassen: die Undurchdringlichkeit. Hiermit sind indeß diese beiden Eigenschaften nicht erklärt. — Unwesentliche Eigenschaften sind solche, die wir zwar an allen Körpern finden, aber ohne daß sie zum Bestehen derselben nothwendig sind. Die wichtigsten derselben sind die Trägheit und die Beweglichkeit, d. h. die Eigenschaften, daß ein Körper seinen Raumzustand zwar nicht von selbst, aber durch eine äußere Einwirkung verändern kann. Auch diese Eigenschaften sind unerklärbare Grundeigenthümlichkeiten des Stoffes. Die übrigen unwesentlichen Eigenschaften, die Theilbarkeit, die Porosität, die Ausdehnbarkeit ergeben sich aus der inneren Bildung des Stoffes. 37

1. Die Ausdehnung. Messen und Meßapparate. Die Ausdehnung ist die Eigenschaft, daß jeder Körper einen Raum einnimmt. Die Größe des eingenommenen Raumes ist der Rauminhalt oder das Volumen des Körpers und die Art der Begrenzung des eingenommenen Raumes bildet die Gestalt. 38

Zur genaueren Messung der Längen dienen die Maßstäbe, welche, wenn sie gerichtliche Geltung oder wissenschaftlichen Werth haben sollen, mit einem Musterstabe verglichen sein müssen. Dazu dient der Comparator. In demselben wirkt der an die Stelle des Musterstabes gelegte Maßstab auf den sehr kurzen einen Arm eines Winkelhebels, so daß bei der geringsten Abweichung das Ende des anderen sehr langen Armes einen bedeutenden Weg auf einer Gradeintheilung zurücklegen muß. Da das Metermaß in vielen Ländern neu eingeführt worden ist, so mußte für jedes Land ein Musterstab angefertigt und mit dem französischen Urmusterstab des Meters auf das genaueste verglichen werden; dieser Urmusterstab (étalon primitif) befindet sich, einmal von Platin und zweimal von Stahl, in den Kellern der Pariser Sternwarte; zur Vergleichung selbst dient das mètre des archives, ein Musterstab auf dem Längenbüreau. Der Musterstab Deutschlands ist 1,000 003 01 des mètre des archives, während der étalon primitif 1,000 003 29 des mètre des archives beträgt. Um die allgemeine Einführung des Metermaßes vorzubereiten, und um für die neue europäische Längen- und Breitengradmessung genaue Maßstäbe zu erwerben, wurde auf den Vorschlag der russischen Akademie und nach mehreren internationalen Conferenzen 1870 von den Regierungen der meisten civilisirten Staaten eine internationale Commission ernannt, welche die Anfertigung und Vergleichung der an die verschiedenen Länder abzugebenden Musterstäbe anzuordnen habe. Am 24. Sept. 1872 wurde von dieser Commission in Paris beschlossen, daß die neuen Maß-Prototype von einem ständigen internationalen Bureau für Maß und Gewicht aus einer Legirung von 9 Th. Platin und 1 Th. Iridium aus einem Gusse angefertigt werden sollen; der Querschnitt solle die Fig. 11 in natürlicher Größe abgebildete Gestalt haben, weil der Stab von der bisherigen Form einer dicken Platte sich zu leicht biege und dadurch die Abstände der Theilstriche ändere, während diese Form es erlaube, die Theilstriche auf der neutralen Faserfläche des Stabes, der Grundfläche des oberen Kanales, anzubringen; sie sollten Strichmaße sein statt der bisher gebräuchlichen Endmaße, d. h. nicht die beiden Endflächen des Stabes sollten die Enden des Meters sein, sondern 2 Striche auf dem etwa 102^{cm} langen Stabe, weil hierbei die Vergleichung mit dem Comparator viel genauer vorgenommen werden könne. Der Comparator für Strichmaße besteht aus einem Wagen, auf welchem die zu vergleichenden Stäbe neben einander liegen, und der bei der Vergleichung unter zwei Mikroskope mit Mikrometern gefahren wird, die in dem zu prüfenden Abstande von einander aufgestellt sind. Nach Wild (1874) vereinigt die von Tresca vorgeschlagene Querschnittsform (Fig. 11) mit dem erwähnten Hauptvorzuge noch eine große

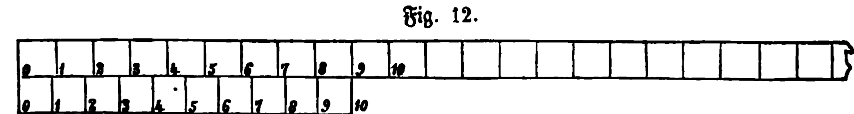
Fig. 11.



Rigidität bei kleiner Masse und eine leichte Mittheilung der Temperatur der Umgebung; sie weiche aber gar zu sehr von der gebräuchlichen, leicht handlichen Plattenform ab, und biete wegen der verwickelten Form große Schwierigkeiten in der homogenen Darstellung. Jacobi hatte schon früher den Wunsch ausgesprochen, daß eine Substanz gewählt werden möge, die nach ihrer chemischen und molekularen Zusammensetzung, sowie durch ihren Ausdehnungscoëfficienten alle Garantien für ihre Homogenität liefere, und welche auch im Laufe der Zeit ihren Coëfficienten nicht ändere, worin z. B. Zink nach Baeyers Untersuchungen (1869) nicht genügt. Nach all diesen Beziehungen befriedigt am meisten der Bergkrystall, besonders wenn man, wie Neumann vorschlägt, den plattenförmigen Stab auf die Hochkante stellt; hierdurch wird nämlich die Biegung sehr gering, und die auf der Mitte der Breitenfläche angebrachte Skale befindet sich von selbst, ohne die verwickelte Querschnittsform Fig. 11, auf der neutralen Faser; jedoch sind hinreichend große Bergkrystalle in der Natur selten. Tresca und Deville setzten daher ihre Studien und Arbeiten für die Maß- und Gewichtsprototype fort, gossen zunächst 1874 einen 250^{kg} wiegenden Barren der Legirung und fertigten daraus 1875 die Maßstäbe und Urgewichte; jedoch hat sich seitdem herausgestellt, daß der gegossene Block nicht hinreichend homogen ist und 2,7 Procent fremde Metalle enthält, von denen 2,3 Proc. oxydabel sind. Die Anwendbarkeit der Stäbe bleibt daher in Frage gestellt, bis Vergleichungen derselben mit reinen Platin-Iridium-Stäben durchgeführt sein werden.

Die so erhaltenen Meterstäbe müssen nun genau getheilt werden; dies geschieht mittels der Theilmaschine (erfunden von dem Herzog von Chaulnes), welche darauf beruht, daß ein den Schneidestift tragender Schlitten durch die Drehung einer langen Schraubenspindel sehr gleichmäßig fortgeführt wird. Auf der Weltausstellung von 1867 befand sich eine mikrometrische Theilmaschine, mit welcher 1^{mm} in 3000 Theile getheilt werden kann. — Oefter benutzt man zu genaueren Messungen größerer Längen den **Nonius** oder Vernier (nach dem Erfinder). Derselbe ist ein an dem eigentlichen Maßstabe verschiebbarer kleiner Stab, welcher z. B. die Länge von 9 Maßstabtheilen in 10 gleiche Theile getheilt enthält; hierdurch wird jeder seiner Theile um $^1/_{10}$ der Maßstabtheile kleiner als diese, so daß diese Zehntel noch abgelesen werden können. (Siehe Fig. 12.)

Fig. 12.



Mikroskopisch kleine Gegenstände legt man unter dem Mikroskop auf Mikrometerplatten; Fraunhofer fertigte eine solche an, welche 32000 Theilstriche auf einem Zolle enthielt; die **Robert**'schen Platten enthalten mehrere Liniensysteme, in welchen sich 400 bis 4000 Linien auf 1^{mm} befinden; Perreaux theilt mit seiner Theilmaschine 1^{mm} in 3000 Theile.

Die Dicke sehr dünner Platten und Drähte mißt man mit dem **Sphärometer**. Dasselbe besteht aus einer **Mikrometerschraube**, welche bei einer Umdrehung z. B. um 1^{mm}, bei 1° Umdrehung daher um $^1/_{360}{}^{mm}$ fortrückt. — Zum Messen und Auffinden größerer Höhenunterschiede an Gebäuden und im Freien bedient man sich der Nivellir-Instrumente. Das einfachste von Bauleuten gebrauchte ist die Setzwage mit Richtscheit, der Pflasterer und Straßenbauer benutzt die Wasserwage, und der Eisenbahnbauer und Geometer das eigentliche Nivellirinstrument, bestehend aus Fernrohr mit Fadenkreuz und einer Libelle. Zum wissenschaftlich genauen Messen kleiner Höhenunterschiede an Apparaten dient das **Kathetometer**, das aus einem auf einem vertikalen Maßstabe verschiebbaren und mit einem Nonius versehenen Fernrohre besteht. Zur Winkelmessung auf dem Papiere und an Gegenständen dienen der Transporteur und das Goniometer; auf dem Felde benutzt man die Boussole (s. 449) und den Meßtisch, einen Zeichentisch mit einem drehbaren Fernrohre, bei dessen Drehung sich ein auf dem Tische liegendes Lineal mitdreht; auf dem Felde und für den Himmelsraum benutzt man den **Theodolit**, ein Fernrohr, das um die Mittelpunkte eines horizontalen und eines vertikalen mit Gradeintheilung versehenen Kreises drehbar ist.

39 **Größte und kleinste Ausdehnung.** Die größte Ausdehnung von den uns bekannten Körpern nehmen die Kometen ein; einige füllen Millionen von Meilen am Himmel aus; doch scheinen sie vorwiegend aus Dunst zu bestehen. Dann folgen die Fixsterne oder Sonnen, von denen unsere Sonne, wahrscheinlich eine der kleineren, einen Durchmesser von 190000 M. hat. Einige Sonnen, z. B. der Sirius, haben nach Bessel fast ebenso große dunkle Begleiter. Die 8 großen Planeten, die größten planetarischen Begleiter unserer Sonne, sind viel kleiner, 600 bis 20000 M. dick; auch die Monde besitzen nur Durchmesser von Hunderten von M., die bis 1883 bekannten 232 Planetoiden 3—60 M. Unser ganzes Sternsystem, von dem Milchstraßenringe umzogen, hat nach Mädler eine Größe von 7700 Jahren Lichtzeit. Merkwürdiger noch erscheinen uns die Körper von kleinster Ausdehnung.

Nach Ehrenberg gehen auf 1 c″ 40 000 Millionen von Infusionsthierchen. Solche Thierchen haben einen Magen, auf dessen Wänden feine Flimmerhaare sich schwingend bewegen und hierdurch den Kreislauf des Nährsaftes erzeugen. Bedenkt man nun noch, daß die Bildung der Haare sehr verwickelt ist, und daß jedes Haartheilchen als organischer Stoff aus vielen Atomen verschiedener Elemente besteht, so erhält man einen ungefähren Begriff von der Kleinheit der Atome und kann sich dann nicht wundern, daß Zuckerwasser und Salzwasser unter dem Mikroskop ganz klar erscheinen. In 1cmm Blut sind 5 Millionen Blutkörperchen enthalten. Ist in einer Flamme nur 1/3000000mg Natrium enthalten, so kann man dies mit dem Spectroskop noch wahrnehmen.

Gestalt. Die Art der Begrenzung eines stofferfüllten Raumes bildet die Gestalt eines Körpers. Unabhängige Flüssigkeiten und wahrscheinlich auch große Massen von jedem Stoffe nehmen, wie sich später ergeben wird, durch den Einfluß der inneren Kräfte Kugelgestalt an. Kleinere Massen von festem Stoffe haben ebenfalls durch ihre inneren Kräfte bestimmte Gestalten, wenn sie bei ihrer Entstehung in leicht bewegliche Theilchen zerlegt waren und allmälig in den festen Zustand übergingen. Sie bilden dann Individuen, selbständige Gestalten, wie die Pflanzen und Thiere, sind von ebenen Flächen regelmäßig umschlossen, und werden K r y s t a l l e genannt. **40**

Krystalle entstehen demnach, wenn flüssige Massen langsam in den festen Zustand übergehen, also wenn ein geschmolzener Körper langsam erkaltet, oder wenn das Lösungsmittel eines gelösten Stoffes langsam verdampft oder anderweitig beschäftigt wird, oder wenn eine heiße gesättigte Lösung eines in der Kälte weniger löslichen Stoffes sich langsam abkühlt u. s. w. Es finden sich daher natürliche Krystalle vorwiegend in Höhlen und Mandelräumen, oft auch in Trümmergestein und in Schwemmland. Auch in den Zellen, den Elementargebilden der Pflanzen- und Thierwelt, auf Schmetterlingsflügeln u. dgl. finden sich krystallähnliche Gestalten, Die Chemie und die chemische Technik erhalten ihre Producte meist aus Lösungen, daher auch meist in Krystallen. Solche Stoffe, welche unlöslich sind, aber durch Zusammenbringen von Lösungen als sogenannte Niederschläge entstehen, erscheinen nur selten als Krystalle, und dann in mikroskopisch kleinen Gestalten, wie z. B. Kaliumplatinchlorid. Die meisten Niederschläge sind amorph. Fremy hat 1866 solche dadurch krystallisirt erhalten, daß er die Fällung künstlich verzögerte. Es wurden z. B. die zusammenzubringenden Lösungen mit Gummi, Zucker, Gelatine vermischt und dann durch eine poröse Scheidewand in Verbindung gesetzt, an welcher sich nun sehr langsam schöne Krystalle von z. B. schwefelsaurem Barium, das sonst als Pulver zu Boden fällt, ansetzten. Hieraus folgt, daß auch in der Natur diese Krystalle durch solche lang andauernden Vorgänge, also aus sehr verdünnten Lösungen entstanden sein können. Jedoch hat Scheerer (1873) auch Krystalle von Schwerspath und Flußspath erzeugt, indem er schwefelsaures Barium und Fluorcalcium in Wasser von 300°, also unter einem Drucke von mehr als 30 Atmosphären löste. In manchen Fällen bilden sich durch Sublimation Krystalle, wie z. B. aus Joddampf.

Gehen die angeführten Krystallisationsprocesse nicht langsam vor sich, so bilden sich zahllose kleine Krystalle, Krystallkeime, die sich gegenseitig in der Ausbildung hemmen; es entsteht das k r y s t a l l i n i s c h e Gefüge. Die meisten Urgebirge, wie z. B. Urkalk, die plutonischen Gebirge wie Porphyr, und die vulkanischen Gebirge wie z. B. Basalt, sind krystallinisch; auch die Metalle sind nicht blos im gefällten, erstarrten und natürlichen Zustande, sondern auch gewalzt und ausgezogen krystallinisch (Kalischer 1882). Aus dem krystallinischen Zustande von Gebirgmassen folgerte man deren Entstehung aus geschmolzener Masse. Andere Geologen behaupten indeß, der krystallinische Zustand könne durch die unendlich vielen zitternden Bewegungen, welche die Erde immer aufnimmt (s. 36) entstanden sein und noch immer entstehen, wie zähes, faseriges Schmiedeeisen sich durch Erschütterungen in sprödes, körniges Eisen umwandele; oder es könnten sich die Massen der genannten Gebirge an der Stelle anderer allmälig durch Sickerwasser gelösten Massen ebenso allmälig aus diesem Wasser abgesetzt oder chemisch ausgeschieden haben und dadurch krystallinisch geworden sein.

Wenn die erwähnten Erstarrungsprocesse zu rasch vor sich gehen, so können auch keine Krystallanfänge gebildet werden: die entstehende Masse ist a m o r p h. Eine geschmolzene Masse behält dann das Gepräge der Schmelzung bei, wird also glasig amorph; die gelöste Masse fällt in ihren einzelnen Theilchen nieder, wird erdig amorph. Solche Massen entstehen auch, wenn krystallinische Stoffe zertrümmert werden. Da nun die Uebergangs- und die Tertiär-Gebirge meist aus zertrümmerten und weggeschwemmten Massen bestehen, wie der Bodengrund, so sind dieselben erdig amorph. — Ist eine Flüssigkeit von gallertiger Beschaffenheit, wie Leimlösung, Kieselsäure, Aluminiumhydroxyd, erhitzte Gummi-Arten, geschmolzene Glasmasse, gluthweiche Metalle, so haben die Theilchen keine leichte Beweglichkeit; es können sich daher beim Festwerden keine Krystalle bilden, selbst dann nicht, wenn Ver-

dunstung oder Abkühlung langsam geschehen. Graham nennt die hierher gehörigen Stoffe Kolloide (κόλλα = Leim und εἶδος = Form) und im Gegensatze hierzu diejenigen Stoffe, welche krystallfähige Flüssigkeiten bilden, Krystalloide. Die Kolloide behalten auch, wenn sie fest geworden sind, meist den gallertigen Anschein, wie Opal, fester Leim, Gummi-Arten, Glas u. s. w. und haben auch dann in ihren inneren Eigenschaften manche Aehnlichkeit mit Flüssigkeiten.

Stoffe, deren Moleküle aus einer gleichen Zahl chemisch sehr ähnlicher Elemente zusammengesetzt sind, wie z. B. die Alaune oder Jodkalium und Chlornatrium, haben gleiche Krystallform; man nennt diese Eigenschaft Isomorphie. Isomorphe Körper haben neben gleicher Gestalt und ähnlicher Zusammensetzung auch gleiches Molekularvolumen und die Fähigkeit, wenn sie bei gleicher Löslichkeit in einer Flüssigkeit gelöst sind, Krystalle zu bilden, die beide Stoffe gleichmäßig gemischt enthalten. Ist aber die Löslichkeit zweier in einer Flüssigkeit gelösten isomorphen Stoffe verschieden, so entsteht ein Krystall, der den schwer löslichen Stoff als Kern und den leicht löslichen als Ueberlagerung enthält, was bei dunkler Farbe des ersten eine schöne Erscheinung bietet; jedoch läßt sich auch der schwerer lösliche zum Ueberlagern bringen (Carl v. Hauer 1880). Die völlige Gleichgestaltigkeit isomorpher Stoffe ist indeß äußerst selten; wird in einer complicirten organischen Verbindung 1 At. H durch ein gleichwerthiges Atom oder Molekül ersetzt, so verändern die Krystallachsen ihre Richtung mehr oder weniger, was Groth (1870) Morphotropie nennt. Besonders untersucht wurde von Friedländer (1879) und von Calderon (1880) der geringe morphotropische Einfluß des Eintritts des Moleküls NO_2 (Nitrogruppe). Es gibt sogar Körper, Elemente und Verbindungen, die unter verschiedenen Umständen verschiedene Krystallgestalten annehmen; so ist Schwefel dimorph. Rührt die Polymorphie davon her, daß in den Molekülen gleich viele Atome eine verschiedene Anordnung haben, so ist eine der Gestalten wandelbar, geht von selbst im Laufe der Zeit in die andere über; so bedeckt sich ein monokliner Schwefelkrystall allmälig mit Octaederchen. Rührt aber die Polymorphie davon her, daß eine verschiedene Anzahl von Molekülen sich zu einem Krystallkeime zusammensetzt, so kann eine Gestalt nur in gewissen Temperaturgrenzen existiren (Lehmann 1877). Alle diese Umstände deuten darauf hin, daß jedem unorganischen Stoffe je nach seiner chemischen Zusammensetzung eine bestimmte Krystallgestalt ebenso eigenthümlich ist, wie jedem Pflanzen- und Thierkörper eine individualisirte Gestalt zugehört; die Krystalle sind die Individuen des Mineralreichs. Jedoch ist es trotz günstiger Anfänge (Schrauf 1867) noch nicht gelungen, die Krystallformen aus der chemischen Constitution abzuleiten, wohl deßhalb, weil jede Substanz als Grundeigenschaft eine eigene Krystallisationsfähigkeit besitzt, ein Satz, den C. v. Hauer (1877) als Resultat vieljähriger Forschungen aussprach. Z. B. Alaunkrystalle lassen sich leicht beliebig vergrößern, Kaliumchlorat krystallisirt dagegen nur in dünnen Schuppen deutlich, Feldspath und Blutlaugensalz krystallisiren mit Vorliebe in Zwillingen. Diese verschiedene Krystallisationsfähigkeit mag wohl mit dem Schwingungszustande der Moleküle zusammenhängen; Marangoni stellte 1877 eine Krystallogenese auf, in welcher die Spaltungsflächen als Knotenflächen auftreten. Dem entspricht eine Untersuchung von Lehmann (1877), wonach unregelmäßig wachsende Krystalle zuerst vorwiegend in der Kantenrichtung wachsen, so daß Krystallskelette entstehen, deren Lücken sich allmälig ausfüllen, während umgekehrt beim Einlegen eines fertigen Krystalls in manche Flüssigkeiten Aetzfiguren entstehen, indem von den Krystallflächen aus nach innen gehende Hohlräume gebildet werden. (Baumhauer 1869—76, Exner 1875, Klocke 1878).

Das weltbekannte Problem der Krystallisation des Kohlenstoffs, der sich nur in der Natur krystallisirt als Diamant findet, ist 1880 dem Engländer Hannay gelungen, aber mit so viel Kosten und Gefahr, daß die wenigen Splitter theurer sind als ein größerer natürlicher Diamant, jedoch unter Umständen, die wissenschaftlich hohes Interesse bieten. Bekannt ist zwar längst, daß manche Dämpfe an kalten Wänden sich zu kleinen Krystallen verdichten, ein Vorgang, den man Sublimation nennt und der z. B. mit Jod leicht ausgeführt werden kann. Neu aber ist, daß in sehr heißen und hoch gespannten Dämpfen feste Stoffe sich auflösen und aus dieser Lösung krystallisirt ausscheiden können. So lösen sich Thonerde, Kieselerde, Zinkoxyd in heißem Wasserdampfe unter sehr hohem Drucke, und so scheint sich auch eben entstehender Kohlenstoff unter sehr hohem Drucke und bei Rothgluth in Dämpfen zu lösen und bei der Abkühlung heraus zu krystallisiren. Hannay füllte eine sehr starke, etwa armslange und -dicke Eisenröhre zu $^2/_3$ mit gereinigtem Knochenöl und Paraffinspiritus, brachte 3g Lithium hinzu, ließ die Röhre zuschließen, 14 Stunden lang auf helle Rothgluth erhitzen und dann langsam abkühlen. In der hohen Temperatur vereinigt sich merkwürdigerweise das Metall Lithium mit dem Wasserstoff der organischen Substanz, wodurch deren Kohlenstoff frei wird, sich in dem hoch gespannten Dampfe löst und beim Abkühlen krystallisirt absetzt. Unter 80 Versuchen dieser Art gelangen nur 3, bei den meisten explodirten die Röhren oder wurden leck. Nur die Anwendung von Lithium, sogar nicht von den nahe

verwandten Metallen Kalium und Natrium ergab ein günstiges Resultat; auch erschien die Gegenwart eines stickstoffhaltigen organischen Stoffes durchaus nöthig, obwohl ein wissenschaftlicher Grund dafür nicht denkbar ist.

41 **2. Die Undurchdringlichkeit** ist die Eigenschaft, daß ein Körper sich nicht gleichzeitig mit einem anderen in demselben Raume befinden kann. Soll also ein Körper den Raum eines anderen einnehmen, so muß er denselben zuerst von seiner Stelle verdrängen. Schon der Tastsinn gibt uns von dieser Eigenschaft Kunde; wir erfahren einen Widerstand, wenn wir uns an die Stelle eines anderen Körpers setzen wollen; dieser auf unseren Tastsinn ausgeübte Widerstand ist sogar der einzig untrügliche Beweis für das materielle Dasein der Körper, da alle anderen Sinne der Täuschung ausgesetzt sind. Dieser Widerstand wächst mit der zu beseitigenden Masse. Beim Gehen in ruhiger Luft spüren wir denselben gar nicht; fühlbarer wird er schon, wenn wir heftigem Winde entgegen gehen, oder wenn wir durch Wasser gehen; der größte Theil der Kraft der Dampfschiffe und auch ein großer Theil der Kraft einer Locomotive wird dazu verwendet, Wasser, resp. Luft zu beseitigen, um deren Stelle einzunehmen.

Noch viele Erscheinungen beweisen uns die Undurchdringlichkeit. Werfen wir einen Körper in ein Wassergefäß, so steigt das Wasser um das Volumen des Körpers; man benutzt dies, um mittels graduirter Wassergefäße das Volumen unregelmäßiger Körper zu finden. Wenn beim Lösen eines festen Körpers oder beim Vermischen von Flüssigkeiten oder beim Verschlucken von Gasen durch feste Körper oder Flüssigkeiten der betreffende Raum sich nicht oder nur wenig vergrößert, so beruht dies nicht auf einer etwaigen Durchdringlichkeit der Körper, sondern darauf, daß die Moleküle des einen Stoffes sich in die molekularen Zwischenräume des anderen Stoffes lagern. — Auch die Luft ist undurchdringlich, wenn wir auch leicht in dieselbe eindringen können; ein luftdicht schließender Kolben läßt sich nie bis auf den Boden des Cylinders drücken; dies beweist, daß die Luft, wenn auch zusammendrückbar, doch undurchdringlich ist. Legt man ein mit einem brennenden Kerzchen versehenes Korkstück auf Wasser und stülpt ein großes Glas darüber, so sieht man das Kerzchen noch brennen, wenn auch das Glas tief unter das Wasser gedrückt ist. Zwar wird die Luft durch den Wasserdruck zusammengepreßt und daher das Kerzchen in dem Glase etwas gehoben; allein die Luft wird nie vom Wasser verdrängt. Darauf beruht die Taucherglocke. Früher hatte dieselbe die Form einer Glocke; später wurde sie nach Smeaton in Form länglich vierseitiger Kasten von Gußeisen, mit Bänken im Innern für die Arbeiter und ihre Werkzeuge angefertigt; in die obere Seite mündete ein Schlauch, durch welchen eine Compressionspumpe frische Luft in die Glocke preßte, während die innere halbverdorbene Luft am unteren Rande in Blasen entwich. In neuester Zeit verwendet man statt der Taucherglocken Kautschuk-Kleidungen, Skaphander genannt, welche den ganzen Körper wasserdicht umhüllen, vor den Augen starke Glasfenster und vor dem Munde ein Kautschukrohr zum Athmen tragen. — Durch einen engen und eng anschließenden Trichter läuft die Flüssigkeit gar nicht, weil die Luft der Flüssigkeit nicht Platz machen kann. Gußformen müssen Luftlöcher haben, damit die Luft entweichen kann. Durch eine enge Oeffnung am Boden eines Gefäßes fließt eine Flüssigkeit sehr langsam oder gar nicht aus, weil in dieser Oeffnung aufsteigende Luft und abfließende Flüssigkeit nicht gleichzeitig vorhanden sein können.

42 **3. Die Theilbarkeit** ist die Eigenschaft, daß jeder Körper sich durch mechanische Verrichtungen, wie Schlagen, Stoßen u. s. w. in kleinere Körper zerlegen läßt. Die Theilbarkeit ist uns ein Beweis von der inneren Getheiltheit des Stoffes; denn wäre derselbe, wie die Dynamisten und viele Philosophen annehmen, innerlich ungetheilt, ununterbrochen, ein Continuum, so würde ein Körper durch Auseinanderziehen zwar immer dünner und dünner, bis ins Unendliche feiner und lichter, nie aber zerrissen werden können. Nach der atomistischen Ansicht erklärt sich dagegen die Theilbarkeit einfach dadurch, daß die theilende Kraft größer sein kann als die Anziehung der Theilchen gegen einander.

Die kleinsten Theilchen, welche künstlich erhalten werden können, werden Massentheilchen oder Partikeln genannt. In den meisten Fällen müssen dieselben noch aus vielen Molekülen oder Atomen bestehen, besonders dann, wenn bei weitgehenden künstlichen Theilungen der Zusammenhang noch nicht aufgehoben ist, wie z. B. in folgenden Fällen: Mit einem Dukaten kann man Roß und Reiter vergolden. — Die Lyoner Goldtressen haben eine Ver-

goldung von $^1/_{100\,000}$mm Dicke; man fertigt sie an, indem man einen vergoldeten Silberstab von 3cm Dicke und 20cm Länge zu einem Drahte von 100 Meilen Länge auszieht; der Goldüberzug dieses Drahtes erscheint selbst unter dem Mikroskop noch zusammenhängend. Es ist sogar gelungen (Outerbridge 1878), durch galvanischen Niederschlag auf einem Kupferblech eine zusammenhängende Goldschicht von $^1/_{90\,000}$mm Dicke zu erzeugen. — Der Wollaston'sche Platindraht ist $^1/_{10\,000}$cm dick und wird nur durch Glühen sichtbar; er wurde angefertigt, indem man einen silberumgossenen Platindraht höchst fein auszog und dann das Silber durch Salpetersäure entfernte. — Auch die Nobert'schen Platten, das Fraunhofer'sche Mikrometer und das Millimeter-Glas von Perreaux sind Beispiele weitgehender künstlicher Theilung. Noch weiter geht offenbar die natürliche Theilung, wie bei der Lösung (1 Theil Fuchsin färbt 1 Million Theile Wasser noch deutlich roth), der Ausbreitung von Riechstoffen (Moschus in einem Dom, Rosmarin am Mittelmeer), der Diffusion der Luftarten. Diese Theilung ist eine Zerlegung bis in die Moleküle.

43 4. **Die Porosität** ist die Eigenschaft, daß die Körper Lücken haben, welche mit anderem als dem Körperstoffe, gewöhnlich mit Luft oder Wasser erfüllt sind. So wie man an Schwamm und Brod, im Innern von Binsen oder Palmenholz mit blosem Auge größere und kleinere Lücken wahrnimmt, so finden sich noch viel zahlreichere, aber sehr kleine und unsichtbare Lücken in jedem festen Körper; und diese Lücken nennt man Poren. Wo man dieselben nicht mit dem Mikroskop wahrnehmen kann, lassen sie sich durch Versuche nachweisen. Macht man ein sehr dichtes Holz, das scheinbar keine Poren hat, zum Boden einer hohen Röhre und füllt diese mit Quecksilber, oder pumpt man unter einem Quecksilber enthaltenden Gefäße aus solchem Holze die Luft weg, so regnet das Quecksilber durch das Holz, wodurch die Porosität desselben offenbar wird. Manche Körper zeigen sich dadurch porös, daß sie, in Flüssigkeit gelegt, Luft entwickeln, wie Kalk, oder durchscheinend werden, wie Hydrophan, Nephelin u. s. w. Die Porosität von Steinen wird besonders durch die schönen Pettenkofer'schen Versuche (1861) deutlich. Werden auf zwei gegenüberliegenden Stellen einer dicken Sandsteinplatte oder Backsteinmauer Röhren hermetisch aufgesetzt und alle übrigen Stellen luftdicht mit Gyps und Harz bekleidet, so kann man mit der einen Röhre Luft in die andere blasen, als ob kein Stein vorhanden wäre, z. B. ein Licht ausblasen oder Leuchtgas durch die Mauer leiten, so daß auf der anderen Seite eine meterlange Flamme entsteht. — Die Porosität der Metalle beweist man durch den Versuch der Academia del Cimento in Florenz (1661). Dieselbe füllte eine hohle Silberkugel mit Wasser und gab derselben dann durch eine starke Pressung eine Formänderung. Da nun, wie die Mathematik beweist, von allen Körpern mit gleich großer Oberfläche die Kugel den größten Inhalt hat, so muß bei einer Formänderung der Inhalt kleiner werden; wirklich bedeckte sich bei diesem Versuche und den häufigen Wiederholungen desselben die Kugel mit Schweiß.

Die Entstehung der Poren erklärt sich dadurch, daß die Körper nicht aus Haufwerken von regelmäßig eng zusammen gelagerten Molekülen bestehen, sondern daß die Moleküle meistens erst zu gewissen Elementargebilden zusammentreten. In der organischen Welt bilden sich Zellen und Fasern und in der Steinwelt Krystallkeime. Wenn sich diese Elementargebilde an einander legen, so müssen zwischen denselben Lücken bleiben, welche die Poren bilden. Da jene Elementargebilde immer noch kleiner sind als die kleinsten Pulverkörnchen, so müssen künstlich aus gepulvertem Stoffe zusammengepreßte Körper, wie künstlicher Graphit, Thongefäße u. dgl., sowie die aus Wasser abgesetzten Boden- und Steinschichten, die größten Poren besitzen; nach diesen Körpern werden hinsichtlich der Größe der Poren wohl erst die organischen Stoffe und die krystallinischen und krystallisirten unorganischen Körper folgen. Die Kohle erhält ihre starke und feine Porosität durch den Abgang der Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle bei der unvollständigen Verbrennung, der unglasirte Thon seine grobe Porosität durch das Austreiben des Wassers beim Trocknen und Brennen. Die Flüssigkeiten und Luftarten haben leicht bewegliche Massentheilchen, welche in jede Lücke hineinrollen müssen, können daher Poren im gewöhnlichen Sinne nicht besitzen; sie haben aber große Molekularzwischenräume, so daß Flüssigkeiten sich innig mit einander vermischen und Luftarten einsaugen können, und daß die Luftarten sich leicht gegenseitig durchdringen, sich in einander ausbreiten oder diffundiren können. Demnach verhalten sich Luftarten und Flüssig-

keiten sehr porös, ohne Poren im gewöhnlichen Sinne zu besitzen. Diejenigen festen Körper aber, welche aus gallertigen Flüssigkeiten entstanden sind, die Kolloide, haben wegen ihrer Entstehung keine Elementargebilde und daher auch keine größeren Lücken, keine eigentlichen Poren; auch ihre Molekularzwischenräume können, da sie feste Körper sind, nur klein sein. Demnach müssen die Kolloide, wie Glas, Gummi-Arten, gehämmerte schweißbare Metalle die geringste Porosität haben. Wenn diese Stoffe dagegen erwärmt und dadurch weich werden, so sind ihre Theilchen leichter beweglich; daher können Gase, welche stark diffundiren, wie Wasserstoff, oder welche eine Art chemischer Anziehung von den Kolloiden erleiden, in großer Menge in dieselben eindringen, und zwar in so großer Menge, daß diese Gase nach Graham's Untersuchungen (1866) wahrscheinlich sogar flüssige oder feste Form annehmen (?) und bei der Abkühlung von den festen Körpern eingeschlossen und durch Anziehung festgehalten werden. So schließt geschmiedetes Platin bei der Rothglut sein 4faches Volumen Wasserstoff ein, geschmolzenes viel weniger, geschmiedetes Palladium gar sein 600faches Volumen Wasserstoff, Eisen sein 4faches Volumen Kohlenoxyd, Silber viel Sauerstoff. Bei geringerer Temperatur ist die Menge der absorbirten Gase viel kleiner. Krystallinische Metalle wie Antimon schließen gar kein Gas ein, weil die Poren derselben so groß und zahlreich sind, daß das eingedrungene Gas durch Reflexion sofort wieder entweicht. Graham unterscheidet hiernach drei Arten von Poren: 1. Poren, welche in Wänden offene Kanäle bilden, so daß Gase einfach vermöge ihres Ausbreitungsbestrebens durch dieselben gehen, wie die Poren von künstlichem Graphit, unglasirtem Thon u. s. w. 2. Poren, welche von Gasen nur mit Hilfe eines äußeren Druckes oder der Anziehung der Porenumgebung durchdrungen werden, wie die Poren von Holz und Stein. 3. Poren, welche vermöge einer Art chemischer Anziehung des Körperstoffs Gase einschließen, so daß diese flüssig werden. Sie finden sich in Kolloiden, verarbeiteten Metallen und Flüssigkeiten und sind wahrscheinlich nur Molekularzwischenräume dieser Körper. Vergleicht man das Gewebe der Moleküle etwa mit einem Fischernetze, so sind die letzteren Poren mit den Maschen desselben, die ersten zwei Arten mit größeren oder kleineren in das Netz gerissenen Löchern vergleichbar.

44

5. Die Trägheit (Galilei 1638) ist die Eigenschaft, daß ein Körper seinen Zustand nicht von selbst ändern kann. Es gilt dies zwar für alle nur denkbaren Zustände; da jedoch alle Zustandsänderungen Bewegungsänderungen sind, so ist kein Zustand ausgeschlossen, wenn wir den Begriff der Trägheit beschränken auf das unthätige Beharren des Stoffes im Zustande der Ruhe und im Zustande der Bewegung. Ist ein Körper in Ruhe, so bleibt er so lange in Ruhe, bis eine Kraft auf ihn einwirkt. Ist er in Bewegung, so kann an diesem Bewegungszustande nur durch eine Kraft etwas geändert werden: der Körper muß daher, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt, mit unveränderter Geschwindigkeit in gerader Linie in's Unendliche gehen. Man nennt diese zwei Sätze zusammen auch das *Gesetz der Trägheit*. Wir haben dasselbe schon (in 15.) unter dem Namen des ersten Newton'schen Gesetzes der Mechanik kennen gelernt, müssen jedoch hier seine Consequenzen weiter ausführen.

Für den Zustand der Ruhe ist das Gesetz der Trägheit sofort einleuchtend; denn wir erfahren oft genug, daß ein ruhender Körper zur Fortbewegung einer Kraft bedarf. Besonders auffallend wird dies, wenn eine Kraft nur auf einen Theil eines Körpers oder einer Körperverbindung wirkt; alsdann wird dieser Theil in Bewegung versetzt, der andere Theil aber nicht, weil sich die Wirkung einer Kraft nicht momentan auf alle Theile fortpflanzt, sondern einer gewissen, wenn auch noch so kleinen Zeit bedarf, um von Theilchen zu Theilchen fortzuschreiten. Wenn wir z. B. in einem ruhenden, aber dann plötzlich abfahrenden Kahne oder Wagen nach vorwärts sitzen, so fährt unser Oberkörper scheinbar zurück, d. h. er bleibt noch in Ruhe zurück, während der Unterkörper sich voran bewegt. — Wenn auf einem Kartenblatte direct über der Mündung einer Flasche eine Münze liegt und das Blatt weggeschnellt wird, so fällt die Münze in die Flasche, weil die Bewegung der Karte so rasch vor sich geht, daß sie sich der Münze nicht mittheilen kann; auf die Münze wirkt keine Kraft, sie bleibt an ihrer Stelle. Aehnliche Erscheinungen sind: das Abschlagen von Mohnköpfen mit einem Stocke und das Ausfließen von Wasser aus einer schnell seitwärts gezogenen Schüssel. — Schießt man eine Kugel durch eine Fensterscheibe, so entsteht ein Loch, ohne daß die Scheibe zersplittert, was bei einem weniger heftigen Schlage geschieht. Ebenso kann man durch ein Brett, das nur leicht in lockeren Boden gestellt ist und durch einen Fingerstoß umgeworfen werden kann, eine Kugel schießen, ohne es umzuwerfen. Eine Thonpfeife, die auf zwei wagrecht gespannten Haaren ruht, kann durch einen kräftigen Hieb entzwei geschlagen werden, ohne daß die Haare zerreißen. — Explosive Stoffe, die zu schnell

explodiren, wie Knallsilber, Jodstickstoff, Schießwolle u. s. w. sind nicht zum Schießen brauchbar, weil nicht Zeit genug zur Uebertragung der Bewegung auf die Kugel vorhanden ist und daher die Geschütze zerspringen. — Ein Faden, der bei ruhigem Heben ein schweres Gewicht zu tragen vermöchte, reißt ab, wenn man mit einem Ruck heben will. Ebenso reißen die Zugstränge eines Wagens, wenn die Pferde beim Abfahren zu rasch und ruckweise ziehen.

45 Auch für den Zustand der Bewegung das Gesetz der Trägheit zu beobachten, bietet das gewöhnliche Leben Gelegenheit genug. Wenn man in einem plötzlich anhaltenden Kahne oder Wagen nach vorwärts sitzt, so fährt man mit dem Oberkörper voran. — Wollte man aus dem rasch fahrenden Zuge springen, so würde man beim Auftreten mit zerschmetternder Heftigkeit in der Richtung des Zuges zu Boden geschleudert werden. — Um Flüssigkeit von einem festen Körper ab- oder auszuspritzen, bewegen wir denselben rasch vorwärts und halten dann plötzlich an. — Auf einem schnell fahrenden Dampfschiffe kann man Ball spielen wie auf dem Lande; denn der Ball behält während des Steigens und Fallens die Bewegung des Schiffes bei; ein Zuschauer am Ufer könnte leicht beobachten, daß der Ball wirklich schief auf- und abwärts geht, während er dem Spieler senkrecht auf und ab zu gehen scheint. — Ebenso fällt ein Stein, den man aus einem Eisenbahnwagen fallen läßt, scheinbar senkrecht zu Boden, beschreibt aber für einen außen stehenden Zuschauer eine schief vorwärts gehende Linie. — Wir machen von der Trägheit in diesem Sinne häufig Anwendung; wir bringen z. B. den Stiel fester in einen Hammer, indem wir ersteren rasch aufstoßen; der Stiel kommt dann plötzlich zur Ruhe, der Hammer aber fährt noch an demselben hernieder. Beim Werfen, Schleudern, Schießen u. s. w. geben wir einem Körper eine gewisse Geschwindigkeit und überlassen ihn dann seiner Trägheit; er geht danach in der Richtung und mit der Geschwindigkeit, die er beim Loslassen hat, weiter. Von der Richtung wird er durch die Anziehung der Erde abgelenkt, seine lebendige Kraft wird durch die ihm entgegentretenden Widerstände aufgezehrt; sonst würde er mit unveränderter Geschwindigkeit in gerader Linie ins Unendliche gehen. Dieser Folgerung widerstrebt anfangs das Gefühl, weil die Erfahtung kein Beispiel dafür zeigt. Vergleicht man aber in Gedanken die Bewegung eines eckigen Körpers, der auf einer lockeren Sandbahn vorangeworfen wird, mit der Bewegung einer glatten Elfenbein- oder Pockholzkugel, die auf einer festgestampften Kegelbahn voranrollt, oder gar mit der Bewegung einer geschliffenen Stahlkugel auf einer diamantenen Bahn, so wird das Widerstreben des Gefühls schwinden.

Wirkt eine Kraft auf eineu Körper ein, z. B. die Dampfkraft auf die Locomotive, so findet bekanntlich erst dann eine Fortbewegung statt, wenn die Kraft so groß ist, daß sie die Widerstände der Reibung und der Luft überwinden kann. Wäre die Dampfkraft gleich dem Widerstande, so würde keine Bewegung stattfinden; demnach muß im Beginne der Bewegung die Dampfkraft größer sein als der Widerstand; erst hierdurch findet neben der Ueberwindung der Widerstände auch eine Erzeugung von Geschw. statt. Nach dem Gesetze der Trägheit behält nun die Masse ihre Geschw. bei; so lange die Kraft größer bleibt als der Widerstand, entsteht in jedem Augenblicke neue Geschw., welche die schon vorhandene vergrößert, so daß die Geschw. ziemlich rasch wächst. Doch ist ein schädliches Uebermaß meist unmöglich; denn die Hindernisse wachsen gewöhnlich, wenn die Geschw. wächst und erreichen endlich eine solche Höhe, daß ihr Betrag dem der Kraft gleich ist. Je schneller z. B. ein Dampfschiff fährt, desto größer ist die zu verdrängende Wassermasse, die Reibung und der Widerstand der Luft; sind diese Widerstände zusammen so groß geworden wie die Kraft der Maschine, so kann die Geschw. nicht mehr wachsen; sie nimmt aber auch nicht ab, da und so lange die Kraft gleich dem Widerstande ist; der Widerstand wird durch die Kraft aufgehoben, und die Maschine läuft nach dem Gesetze der Trägheit mit unveränderter Geschw. fort. Der sogenannte Anlauf der Maschine ist zu Ende, ihr Beharrungszustand ist eingetreten; soll der Endlauf eintreten, so wird die Wirkung der Kraft, z. B. das Einströmen des Dampfes aufgehoben; es zehren dann die Widerstände, die oft noch durch Bremsen vergrößert werden, allmälig die gesammte leb. Kraft auf, bis die Geschw. = Null ist und die Maschine stillsteht. Noch einfacher ist der Beharrungszustand der Weltkörper; ihnen wirken keine Widerstände entgegen, daher bewegen sie sich nach dem Gesetze der Trägheit ohne Ende fort.

Wenn das Gesetz der Trägheit für die Bewegung nicht bestände, so müßte ein Vogel, der von seinem Neste fliegt, in wenigen Augenblicken viele Meilen von demselben entfernt sein, da die Erde sowohl auf ihrer Bahn um sich selbst, als auch um die Sonne unter dem Vogel fortrollen müßte; ein starker Sprung würde für eine Reise hinreichend sein. Als man zuerst die Drehung und die Fortbewegung der Erde näher ins Auge faßte, stellten Gegner dieser Bewegungen, welche das Gesetz der Trägheit noch nicht kannten, ähnliche Einwendungen auf; selbst bedeutende Astronomen, wie Tycho de Brahe und Riccioli meinten, wenn die Erde sich wirklich nach Osten drehe und fortbewege, so müsse ein von einem Thurme herabfallender Stein westwärts vom Fuße des Thurmes auf dem Boden anlangen. Als nun aber Galilei 1638 den Begriff der Trägheit aufgestellt und jenen Einwurf dadurch beseitigt hatte, machte Newton aus demselben sogar einen Beweis für die Umdrehung der Erde. Da nämlich die Spitze eines Thurmes weiter vom Mittelpunkte der Erde entfernt ist als der Fuß desselben, so muß, wenn die Erde sich wirklich dreht, die Spitze auch eine größere Geschwindigkeit nach Osten haben als der Fuß; ein von der Thurmspitze herabfallender Stein muß nun nach dem Gesetze der Trägheit diese größere östliche Geschwindigkeit während des Fallens beibehalten und daher etwas östlich vom Fuße des Thurmes zu Boden fallen. Aus dem Halbmesser der Erde und der Höhe des Thurmes läßt sich der Unterschied berechnen; die Versuche Benzenbergs (1802) am Michaelis-Thurme zu Hamburg haben jene Folgerung sowohl der Art als der Größe nach bestätigt und demnach die Wahrheit der Voraussetzung, nämlich die Drehung der Erde bewiesen.

Wenn ein ruhender Körper sich ohne die Einwirkung einer Kraft nicht bewegen kann, so ist damit auch ausgesprochen, daß durch eine solche Einwirkung jeder Körper bewegt werden, also Arbeit oder lebendige Kraft in sich aufnehmen kann. Diese Möglichkeit, daß ein Körper durch eine Kraft bewegt werden kann, nennt man die Bewegbarkeit, eine allgemeine Eigenschaft, welche in dem Begriff der Trägheit schon enthalten ist. Es wurde schon dargethan, daß die bewegende Kraft direct der zu bewegenden Masse und der zu erzielenden Geschwindigkeit und indirect der hierzu nöthigen Zeit proportional ist. Bei dem Princip von der Erhaltung der Kraft, wonach sich eine Kraft unverändert von Masse zu Masse überträgt, ist natürlich vorausgesetzt, daß eine und dieselbe Masse ihre lebendige Kraft unverändert beibehält, wenn sie sich selbst überlassen bleibt; es ist also dort die Eigenschaft der Trägheit stillschweigend vorausgesetzt.

46 **Die Centrifugalkraft** (Huyghens 1673). Wenn ein Körper sich in gerader Linie bewegt, so ist die Kraft, mit welcher er in dieser Linie fortgeht, seine lebendige Kraft. Wenn ein Körper gezwungen ist, sich in krummer Linie zu bewegen, so ist das Bestreben, nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie fortzugehen, durch jenen Zwang nicht aufgehoben; denn beim Aufhören dieses Zwanges sehen wir einen Körper sofort in derjenigen Richtung weiter gehen, welche er im Momente des Aufhörens hatte, d. h. in der Richtung der Tangente an die krumme Bahnlinie; z. B. wenn wir einen Faden mit einem daran gebundenen Gewichte im Kreise schwingen, so bewegt sich das Gewicht, wenn der Faden reißt, in der Richtung der Tangente für den Punkt des Losreißens fort. Der Körper hat also ein von seiner lebendigen Kraft herrührendes Bestreben, in gerader Linie weiter zu gehen, das man Tangentialkraft nennt. Wenn er nun wirklich nach Aufhören des Zwanges in gerader, tangentialer Richtung weiter geht, so entfernt er sich von seiner krummen Bahn, und wenn diese ein Kreis war, von dem Mittelpunkte des Kreises; folglich ist auch schon vorher ein Bestreben vorhanden, sich von der Bahn, von dem Centrum zu entfernen; daher wird in der Richtung von dem Centrum nach dem Umfange hin ein Druck gegen die Bahn ausgeübt, den man die Centrifugalkraft oder Fliehkraft des Körpers nennt. Die Größe dieser Kraft muß ebenfalls der lebendigen Kraft des Körpers proportional sein; denn sie rührt ja von dem Bestreben her, in gerader Linie weiter zu gehen. Eine flüchtige Betrachtung zeigt indeß auch, daß sie in umgekehrtem Verhältnisse zu dem Radius der Bahn steht: denn je stärker die Bahn gekrümmt, je kleiner also der Radius ist, um so mehr entfernt sich ein Körper bei einem und demselben Wege von derselben. Genauer wird dies später in 141. bewiesen werden; es wird dort festgestellt, daß die Centrifugalkraft $F = mv^2/r$, oder die Centrifugalkraft eines Körpers ist direct proportional der Masse

und dem Quadrat der Geschwindigkeit, sowie umgekehrt proportional dem Radius seiner Bahn. Die Richtigkeit dieser Formel ist mit der Schwungmaschine nachzuweisen. Näheres hierüber bei der Centralbewegung.

Aufgabe 68. Wie groß ist die Centrifugalkraft einer 0,1kg schweren Bleikugel, die an einem 1m langen Faden 3mal per Secunde im Kreise geschwungen wird? Aufl.: $v = 3.2.3{,}14.1 = 18{,}84^m$; $r = 1^m$, $m = 0{,}1 / 10 = 0{,}01$; daher $F = 3{,}55^{kg}$. — A. 69. Wie groß ist die Schwungkraft eines Aequatorbewohners? Aufl.: $v = 464^m$; folglich $F = {}^1/_{289}\, p$, wo p das Gewicht des Körpers. — A. 70. Wann würde die Schwere eines Aequatorbewohners durch seine Schwungkraft aufgehoben? Aufl.: Wenn die Erde sich 17mal schneller drehen würde. — A. 71. Wann wäre überhaupt die Schwungkraft eines Körpers dem Gewichte desselben gleich? Da $F = mv^2 / r = (p / g)\ (v^2 / r)$, so wäre $F = p$, wenn $v^2 / rg = 1$ wäre, wenn also $v^2 = rg$. — A. 72. An unserer Schwungmaschine verhält sich das große Rad zum kleinen, wie 37:8; in einer Entfernung von 15cm von der Achse des kleineren Rades sitzt ein Gewicht von 62,5g; welches Gewicht kann dasselbe heben, wenn das große Rad in 1 Sec. 1mal gedreht wird? Aufl.: ca 0,7kg.

47 **6. Die Ausdehnbarkeit und das Thermometer.** Die Ausdehnbarkeit (Extensibilität) ist die Eigenschaft, daß jeder Körper seinen Rauminhalt oder sein Volumen vergrößern kann; den Gegensatz zu derselben bildet die Zusammendrückbarkeit (Compressibilität), nämlich die Eigenschaft, daß das Volumen jedes Körpers verkleinert werden kann. Das letztere geschieht, wenn auf den Körper ein Druck ausgeübt wird, oder besser, da alle Körper schon unter dem Drucke der Luft stehen, wenn der Druck auf den Körper vermehrt wird; es geschieht aber auch, wenn die Wärme eines Körpers vermindert, wenn der Körper abgekühlt wird. Umgekehrt dehnt sich der Körper aus, wenn der Druck auf denselben verkleinert, oder wenn eine auseinander ziehende Kraft auf denselben ausgeübt wird, sowie wenn der Körper erwärmt wird. Durch Druck werden die festen Körper sehr verschieden stark zusammengepreßt, im Allgemeinen um so mehr, je poröser sie sind. Die flüssigen Körper haben keine Lückenporen, und ihre Moleküle sind nicht viel weiter von einander als bei den festen Körpern; daher ist ihre Zusammendrückbarkeit durch den Druck gering. Sehr groß ist dagegen diejenige der luftförmigen Stoffe, weil ihre Moleküle sehr weit von einander entfernt sind; auch ist dieselbe sehr regelmäßig: genau so, wie der Druck wächst, nimmt das Volumen ab (Mariottes Gesetz). Ebenso verhält es sich mit der Ausdehnbarkeit bei Verminderung des Druckes; die Luftarten dehnen sich hierdurch am meisten aus. Auch durch die Wärme dehnen sich die Luftarten am meisten aus; dann folgen die Flüssigkeiten; am geringsten, aber mit unüberwindlicher Gewalt dehnen sich die festen Körper aus. Von dieser Einwirkung der Wärme macht man viele Anwendungen; z. B. auf der verschwindend kleinen Ausdehnbarkeit des Glases und auf der großen und gleichmäßigen Ausdehnbarkeit des Quecksilbers durch die Wärme beruhen die Thermometer, die Apparate zum Bestimmen und Messen der Wärmehöhe oder der erwärmenden Kraft der Wärme oder der Temperatur.

Die gewöhnlichen Thermometer bestehen aus einer sehr engen Glasröhre, an welche eine Kugel angeblasen ist. Die Kugel und ein Theil der Röhre sind mit Quecksilber gefüllt, der übrige Theil ist luftleer und zugeschmolzen. Nimmt nun die Temperatur zu, so dehnt sich das Glas nur außerordentlich wenig, das Quecksilber aber ziemlich stark aus. Da dasselbe nirgends sonst Raum findet, so muß es sich in den leeren Theil der Röhre ausbreiten: das Thermometer steigt. Wird die Temperatur niedriger, so zieht sich das Quecksilber zusammen; daher muß sich der in der Röhre befindliche Theil wegen der gegenseitigen Anziehung der Quecksilbertheilchen mehr nach der Hauptmasse in der Kugel hinziehen: das Thermometer fällt. Das Fallen und Steigen des Thermometers gibt demnach ein Maß für das Fallen und Steigen der Temperatur.

Um die Größe des Fallens und Steigens messen und an verschiedenen Orten

vergleichen zu können, mußte man feste Grundpunkte an dem Thermometer auffinden, die für alle Orte genau dieselben sind und daher von Jedem bestimmt werden können. Man nahm dazu aus später erhellenden Gründen die zwei Punkte, an welchen das Quecksilber steht, wenn Eis schmilzt und wenn Wasser siedet. Den ersten nannte man den **Eispunkt**, den letzten den **Siedepunkt**. Den Zwischenraum der beiden Punkte theilt man in gleiche Strecken, die man auch noch über den Siedepunkt und unter den Eispunkt trägt und **Grade** nennt. Leider haben verschiedene Gradeintheilungen Eingang gefunden. Der Franzose Réaumur theilte jenen Raum in 80 Grade und schrieb an den Eispunkt 0; dieses Thermometer ist in Deutschland gebräuchlich. Der Schwede Strömer (1750) theilte den Raum in 100 Grade, schrieb indeß auch an den Eispunkt 0; dieses Thermometer ist in Frankreich und in der Wissenschaft eingebürgert. Der Deutsche Fahrenheit theilte den Zwischenraum in 180 Grade, schrieb aber an den Eispunkt 32, legte also seinen Nullpunkt 32 Grade unter den Gefrierpunkt; dieses Thermometer wird in England gebraucht, in den englischen Colonien, und wo der englische Handel überwiegt; es hat also die weiteste Verbreitung. Man schreibt 37 Grade des Réaumur'schen Thermometers: 37° R; ebenso bedeuten 73° F = 73 Grade nach Fahrenheit. Die Grade nach Strömers Skale bezeichnet man mit C, z. B. 18° C, weil man den Schweden Celsius für den Urheber dieser Skale hielt; man kann diese allgemein verbreitete Bezeichnungsweise festhalten, muß aber dann Centesimal- oder **Centigrade** lesen, da Celsius (1742) eine andere Skale vorgeschlagen hatte, nämlich an den Eispunkt 100 und an den Siedepunkt 0 schrieb (Schwed. Abhandlungen 1742 S. 204). Grade unter Null erhalten das Minus-Zeichen und werden häufig irriger Weise Kältegrade genannt.

Es ist leicht ersichtlich, daß 4° R = 5° C, 4° R = 9° F, 5° C = 9° F, daß also Grade der einen Skala sich leicht in Grade einer anderen verwandeln lassen. Nur bei der Verwandlung von ° F muß man sich erinnern, daß dieselben von einem 32° tieferen Punkte anfangen als die anderen, daß man also vor der Verwandlung diese 32° abzählen muß; bei Verwandlung in Fahrenheit muß man diese den anderen Skalen fehlenden 32° nach der Verwandlung addiren. Es ist $1^0 R = \frac{5}{4}{}^0 C = \frac{9}{4}{}^0 F$; daher $n^0 R = \frac{5}{4} n^0 C = \frac{9}{4} n + 32^0 F$; ebenso $n^0 C = \frac{4}{5} n^0 R = \frac{9}{5} n + 32^0 F$; $n^0 F = \frac{5}{9} (n - 32)\,{}^0C = \frac{4}{9} (n - 32)\,{}^0 R$.

Aufg. 73. Die Butter schmilzt bei 32° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl.: $25\frac{3}{5}$° R; $89\frac{3}{5}$° F. — A. 74. Der Weingeist siedet bei 78° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl: $62\frac{2}{5}$° R; $172\frac{2}{5}$° F. — A. 75. Das Brom gefriert bei — 25° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl.: — 20° R; — 13° F. — A. 76. In Jakutzk ist im Januar eine Kälte von — 43° C; wieviel R u. F? Aufl.: — $34\frac{2}{5}$° R. — $45\frac{2}{5}$° F. — A. 77. Englische Reiseberichte geben oft aus tropischen Gegenden eine Hitze von ca. 100° an; wieviel R? Aufl.: $30\frac{2}{9}$° R, eine Hitze, die auch bei uns vorkommt. — A. 78. Die höchste auf der Erde im Freien beobachtete Temperatur (Murzuk) betrug 130° F; wieviel R u. C? Aufl: $43\frac{5}{9}$° R; $54\frac{4}{9}$° C. — A. 79. Wie schreiben wir den Fahrenheit'schen Nullpunkt? Aufl.: 0° F = 32° F unter dem Eispunkt = — 32 . $\frac{4}{9}$ = — $14\frac{2}{9}$° R, eine Kälte, die bei uns selten vorkommt. — A. 80. Wieviel R u. C sind 20° F? Aufl.: — $5\frac{1}{3}$° R; — $6\frac{2}{3}$° C. — A. 81. Wie schreiben die Engländer unsere Winterkälte von — 10° R, bei welcher der Rhein zufriert? Aufl.: — 10° R = $9\frac{1}{2}$° F. — A. 82. Schmiedeeisen schmilzt bei 1200° R, Wachs bei 48° R; wie viel C u. F sind es? Aufl.: 1500° C, 2732° F; 60° C, 140° F. — A. 83. Die größte auf der Erde beobachtete Winterkälte in Werchojansk in Sibirien am 31. Dez. 1871 betrug — 63,2° C. Wie viel R u. F? Aufl.: — $50\frac{1}{2}$ R; — $81\frac{3}{4}$° F. — A. 84. Die größte von Faraday künstlich erzeugte Kälte war — 110° C. Wie viel R u. F sind es? Aufl.: — 88° R; — 166° F. — A. 85. Nach älteren Angaben beträgt die Temperatur der Knallgasflamme 6880° C. Deville machte auf die Unmöglichkeit dieser Höhe aufmerksam, da Wasser sich zwischen 2000 und 3000° theilweise zersetze. Genauere Rechnungen von Bunsen (1867) ergaben nur 2844° C. Um wie viele R u. F differiren diese Angaben? Aufl.: $3228\frac{4}{5}$° R; $7296\frac{4}{5}$° F.

48

3. Allgemeine Kräfte.

49 Allgemeine Kräfte sind solche Kräfte, welche entweder in allen Körpern enthalten sind oder doch in allen Körpern hervorgerufen werden können. Zu den ersteren gehören die Anziehung und die Wärme, zu den letzteren der Schall, das Licht, die Elektricität und der Magnetismus. Die 5 letzteren sind Energien, lebendige Kräfte, oder Spannkräfte, und werden demnach in Arbeitsmaß gemessen oder auch durch einen gewissen Betrag ihrer specifischen Wirkung, wie z. B. die Wärme durch Calorien. Die Anziehung ist gewiß auch das Resultat einer unbekannten Energie; sie ist aber nicht selbst Energie, sondern ein Druck oder Zug, wird also auch durch die Einheit von Druck und Zug, durch Gewichte gemessen; die anderen Kräfte, die Energien, bewirken ebenfalls Druck und Zug, der aber nach der Größe des Widerstandes und dem Wege gemäß verschieden ist. Dieser Druck oder Zug wird häufig ebenso, wie der Widerstand und der von der Anziehung ausgeübte Druck oder Zug mit dem Worte Kraft bezeichnet und durch Gewichte gemessen.

1. Die Anziehung oder Attraction.

50 **Die Anziehung ist die Kraft der Körper, in Folge deren sie sich einander nähern.** Das Vorhandensein derselben in allen Körpern ist durch eine große Anzahl von Erscheinungen und Versuchen dargethan. Beim Krystallisiren schießt die krystallisirende Masse lebhaft nach einem Krystallkeime hin; die Krystalle setzen sich vorwiegend an feste Körper, an eingehängte Fäden, an den Rand des Gefäßes an; weitere Hinweise sind in 9. aufgezählt. Bouguer und Condamine fanden schon 1740, daß der Chimborasso ein Bleiloth in einer gewissen Entfernung um 7,5″ von der lothrechten Richtung ablenke. Maskelyne und Hutton stellten ähnliche Versuche an dem Berge Shehallien in Pertshire 1776—1778 an und fanden eine Ablenkung von 5,83″. Cavendish hängte 1798 an einer höchst empfindlichen Drehwage Bleikugeln auf und fand, daß dieselben von einer anderen Bleikugel mit 22^{cm} Durchmesser eine Anziehung erlitten, deren Größe er gleich $^1/_{50\,000\,000}$ des Kugelgewichtes bestimmte.

Aus dieser Zahl geht hervor, daß die Anziehung der irdischen Körper nicht groß genug ist, um die Hindernisse der Bewegung zu überwinden, daß man sich also nicht zu verwundern braucht, wenn die Körper trotz ihrer gegenseitigen Anziehung nicht zu einander laufen.

51 Das Wesen der Anziehung ist uns unbekannt; möglicherweise hat sie ihren Grund in der Stoßkraft der Aetheratome. Sie wirkt so, als ob sie in den Körperatomen ihren Sitz hätte, und ist demnach die Ursache, daß mehrere Atome zusammen ein Molekül bilden, d. h. eine gewisse Gruppe, welche trotz der lebhaften Bewegung der Atome ein fest zusammenhaltendes Ganzes ausmacht. Sie hat nach der verschiedenen Größe und Beschaffenheit der Massen, durch und auf welche sie wirkt, eine verschiedene Art des Auftretens und darnach auch verschiedene Namen.

a. Die Molekularanziehung, d. i. die Anziehung der Moleküle gegen einander; in zusammengehörendem Gegensatze zu derselben steht die Molekularabstoßung, welche in der lebendigen Kraft der Atome und Moleküle beruht, sowie in der abstoßenden Kraft des Aethers. Die Molekularanziehung verhindert das Zerstreuen der Moleküle, das Auseinandergehen derselben ins Unendliche; die Molekularabstoßung das Zusammenfließen derselben. Diese beiden zusammengehörenden Kräfte werden auch Molekularkräfte genannt.

b. Die chemische Verwandtschaft, d. i. die Anziehung, welche die einander sehr nahe gebrachten Atome der Körper auf einander ausüben.

c. Die Cohäsion, d. i. die Kraft, mit welcher die Theilchen eines und desselben Körpers an einander haften.

d. Die Adhäsion, d. i. die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Theilchen verschiedener Körper an einander haften.

e. Die Schwere oder Schwerkraft, d. i. die Anziehung eines Weltkörpers gegen die einzelnen Körper desselben.

f. Die Gravitation, d. i. die Anziehung der Weltkörper gegen einander.

Das Gravitationsgesetz (Newton 1682). Ob wirklich diese verschiedenen Kräfte nur Modificationen einer und derselben Kraft, nämlich der Anziehung der Körperatome sind, ist zwar wahrscheinlich, kann aber nicht durchaus mit Bestimmtheit behauptet werden. Einige Forscher, wie Redtenbacher, halten dieselben für wesentlich verschiedene Kräfte. Man möchte in der That an der Einheit derselben zweifeln, wenn man beobachtet, daß Körper, die in gleichem Raume gleiches Gewicht enthalten, also eine ganz gleiche Anziehung von der Erde erleiden oder gleiche Schwere haben, doch die verschiedenste Cohäsion und ganz ungleiche chemische Verwandtschaften zeigen. Von den zwei letzten der angeführten Kräfte indessen kann man mit Bestimmtheit angeben, daß sie identisch sind. Schwere und Gravitation sind dieselbe Kraft; denn sie wirken in demselben Körper ganz in derselben Weise und nach demselben Gesetze, nämlich nach dem Gravitationsgesetze, das den Namen Newton unsterblich gemacht hat. Dieses Gesetz drückt aus, wie die Anziehung zweier Körper von ihrer Masse und von ihrer Entfernung abhängt. Die Anziehung wird nämlich in demselben Maße größer, wie die Masse eines der beiden Körper größer wird; kennt man die Anziehung, die ein Körper durch einen anderen erfährt, so kann man auch sofort die Anziehung angeben, die ein Körper von der 2, 3, 4 .... fachen Masse durch denselben Körper erfährt; diese ist nämlich 2, 3, 4 .... mal so groß als jene. Es ist uns leicht begreiflich, daß 1000 Atome eines gewissen Körpers eine 1000fach größere Anziehung erleiden als 1 Atom desselben Körpers, weil eben 1 Atom ebenso stark angezogen wird als das andere; ebenso sehen wir leicht ein, warum 1000 Atome die 1000fache Anziehung eines Atoms desselben Stoffes ausüben. Dagegen ist es noch unerklärt, warum die Atome verschiedener Stoffe eine nach ihrer Masse verschiedene Anziehung ausüben und erleiden, und warum diese Anziehung ganz gleichmäßig mit den Massen des anziehenden und des angezogenen Körpers, oder besser gesagt, mit den Massen der sich gegenseitig anziehenden Körper wächst. Wir müssen dies so lange als ein durch zahllose Erfahrungen festgestelltes Factum annehmen, bis das Wesen der Anziehung ergründet ist. Eher begreiflich erscheint uns schon der zweite Theil des Gesetzes, daß die Anziehung bei wachsender Entfernung abnimmt und umgekehrt. Da nämlich die Strahlen der Anziehung von einem Massenpunkte aus sich nach allen Richtungen ergießen, so wirkt dieselbe Kraftmenge auf immer größere Kugelflächen, je weiter man sich von dem Punkte entfernt; diese Kugelflächen wachsen aber mit den Quadraten der Radien oder der Entfernungen; folglich kann auf einen und denselben Körper, wenn er in eine 2, 3, 4 .... fache Entfernung gebracht wird, nur der 4, 9, 16 .... te Theil der Kraftwirkung ausgeübt werden. Und wirklich fand Newton, daß der Mond, der die 60fache Entfernung eines Steines vom Erdcentrum besitzt, nur den 3600ten Theil der Anziehung erfährt, die auf den Stein ausgeübt wird, und daß die Erde, deren Entfernung von der Sonne nur den 5ten Theil der des Jupiters beträgt, von der Sonne die 25fache Anziehung des Jupiters erleidet. 52

Bezeichnen wir demnach diejenige Anziehung, welche zwei Körper, deren Masse $= 1$ und deren Entfernung $= 1$ ist, auf einander ausüben, mit C, so ist die Anziehung der Masse m auf die Masse m' in der Entfernung $1 = C.mm'$, jedoch in der Entfernung r ist $k = C.mm'/r^2$. Dies ist der mathematische Ausdruck von Newtons Gravitationsgesetz . . . . (12)

Oder mit Worten: Die Anziehung zweier Körper steht im geraden Verhältnisse zu ihren Massen und im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat ihrer Entfernung.

Befindet sich ein Körper im Inneren eines anderen, so gilt dieses nicht mehr nach allen Beziehungen; wir werden diesen Fall speciell in der Lehre von der Schwerkraft (78.) betrachten. Für die übrigen Anziehungskräfte ist ein Gesetz noch nicht nachgewiesen. Es wird behauptet, daß für dieselben das Gravitationsgesetz nicht gelten könne; denn wird ein Körper in zwei Theile zerbrochen, und werden dann die Theile genau mit den Bruchflächen wieder zusammengelegt, so sind die Theilchen nicht viel weiter von einander als vor dem Bruche, und haften doch nicht mehr fest an einander; es müsse also, schließt man hieraus, die Abnahme der Cohäsion in viel stärkerem als dem quadratischen Maße stattfinden. Allein nach dem Bruche ist eine nicht zu beseitigende Luftschicht zwischen den Bruchflächen, welche die unmittelbare Berührung verhindert; es kann die Entfernung alsdann doch immer leicht viel größer sein als vor dem Bruche; denn 0,1mm Entfernung, die uns unmerklich erscheint, ist immerhin das 1000 fache von 0,0001mm Entfernung, die doch noch keine unmittelbare Berührung ist; und in dem letzten Falle wäre die Anziehung schon die 1 000 000 fache des ersten Falles, wenn das Gravitationsgesetz Geltung hätte; es scheint demnach das Gravitationsgesetz auszureichen, um den festen Zusammenhalt fester Körper zu erklären. Von dieser Seite steht also nichts entgegen, Cohäsion, Adhäsion u. s. w. als Aeußerungen der allgemeinen Anziehung zu betrachten. Die Verschiedenheiten in dem Auftreten dieser Kräfte mögen in der Stoffverschiedenheit der Körper, in der verschiedenartigen Bewegung der Moleküle und der Atome innerhalb der Moleküle ihren Grund haben.

a. Die Molekularkräfte und die Aggregat-Zustände.

53 **Feste und flüssige Körper.** Die Molekular-Anziehung und Molekular-Abstoßung bilden, in Verbindung mit der Stoffeigenthümlichkeit der Körper, die Ursache von der Art, wie die Theilchen zusammen ein Ganzes bilden, oder die Ursache des Aggregatzustandes (aggrego, zusammenschaaren). Man unterscheidet drei Aggregatzustände: den festen, den flüssigen und den luftförmigen Zustand. Ein fester Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sich nur durch größere Kraft von einander trennen lassen, der demnach ein selbständiges Volumen und selbständige Gestalt besitzt.

Dieser feste Zusammenhang der Theilchen ist nur möglich, wenn die Molekular-Anziehung groß ist, wenn also die Moleküle einander sehr nahe sind und sich auch nicht weit von einander entfernen; demnach können die Moleküle fester Körper nur eine geringe fortschreitende Bewegung haben, ihre hauptsächliche Bewegung muß aus Schwingungen um ihre mittlere Lage bestehen (18.). Bei der vorausgesetzten inneren Bildung der festen Körper muß auch bei der Entstehung derselben die molekulare Anziehung den Haupteinfluß ausüben; da dieselbe nun, gemäß der Zusammensetzung der Moleküle aus Atomen, nach verschiedenen Richtungen in gesetzmäßig verschiedener Stärke wirkt, so müssen bei der vorwiegenden Wirkung der Molekularkräfte regelmäßig durch Ebenen begrenzte Gestalten entstehen, welche Krystalle oder den krystallinischen Zustand bilden (Näheres 40.).

Ein flüssiger Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sich mit der geringsten Kraft verschieben lassen, aber doch noch einen Zusammenhang haben; demnach hat ein flüssiger Körper zwar selbständiges Volumen, aber keine selbständige Gestalt; denn sowohl die Anziehung der Erde, als auch die von anderen nahen Körpern kann die Theilchen aus ihrer Lage bringen.

Die absolut leichte Beweglichkeit kann nur dadurch neben dem, wenn auch noch so geringen Zusammenhange möglich sein, daß jedes Theilchen durch die lebendige Kraft seiner Bewegung jeden Augenblick aus dem Anziehungskreise seiner Nachbarmoleküle herausgeht, um aber sofort zu anderen Molekülen in dieselbe Lage zu kommen. Demnach müssen die Moleküle der flüssigen Körper theils fortschreitende, theils schwingende Bewegung besitzen. Es kommt daher die molekulare Abstoßung, welche aus der lebendigen Kraft der fortschreitenden Bewegung besteht, hier schon zu bedeutender Wirkung (Näheres 18.).

Wegen der absolut leichten Verschiebbarkeit der Theilchen sind größere Lücken zwischen den Molekülen unmöglich, die Flüssigkeiten besitzen keine Poren im gewöhnlichen Sinne, sind daher auch nur wenig zusammendrückbar.

Dies wird durch die Versuche mit dem Piëzometer (πιέζω, zusammendrücken) bestätigt. Das Piëzometer besteht aus einem birnförmigen, mit einer sehr engen Röhre verbundenen Gefäße, welches in Wasser eingesenkt und dann durch Zupumpen von Wasser oder Luft einem starken Drucke ausgesetzt wird, nachdem man es mit der zu comprimirenden Flüssigkeit gefüllt hat. Die Versuche von Regnault (1847) ergaben, daß durch einen Druck von 1^{at} das Quecksilber um 3, Wasser um 44—50, Alkohol um 83—99 Milliontel ihres Volumens comprimirt werden. Auch das Meerwasser wird nur um 44 Milliontel comprimirt, also durch 200^{at} etwa um 1 Hundertel: demnach ist das Meer in der größten Tiefe nur wenig dichter, z. B. in 2000^{m} Tiefe nur um 1 Hundertel dichter als an der Oberfläche. Nach Untersuchungen von Amagat (1877) steigt bei den meisten Flüssigkeiten (Wasser ist ausgenommen) die Compressibilität bedeutend mit der Temperatur; so ist sie z. B. für Aether bei $13^{0} = 167$, bei $99^{0} = 555$ Milliontel.

Ein luftförmiger Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sämmtlich das Bestreben haben, sich auszubreiten; daher sind diese Theilchen auch sehr leicht verschiebbar, haben aber keinen Zusammenhang mehr, sondern breiten sich in jeden geöffneten Raum aus, so daß ein luftförmiger Körper weder selbständiges Volumen, noch selbständige Gestalt hat. Bei den luftförmigen Körpern überwiegt die molekulare Abstoßung.

54

Die mechanische oder kinetische Theorie der Gase. Um dieses Ausbreitungsbestreben (Ausdehnsamkeit), zu erklären, haben Krönig und Clausius (1857) folgende, schon in 18. erwähnte Theorie aufgestellt. Alle Moleküle eines Gases sind fortwährend in lebhaft fortschreitender geradliniger Bewegung, so lange bis sie gegen eine feste Wand oder gegen andere Gasmoleküle treffen und dann zurückgeworfen werden. Krummlinig ist die Bahn der Moleküle deßwegen nicht, weil sie sich in verhältnißmäßig so großen Entfernungen von einander befinden, daß ihre gegenseitige Wirkung auf einander unmerklich ist. Aus demselben Grunde sind die Luftarten alle sehr stark zusammendrückbar; jedoch wächst die Kraft, welche zur Zusammendrückung nothwendig ist, mit der Größe dieser letztern. Diese und andere Folgerungen ergeben sich aus der gemachten Voraussetzung über die Constitution der Gase mit Nothwendigkeit. Alle in einem gewissen Volumen enthaltenen Gasmoleküle stoßen nämlich vermöge ihrer Geschwindigkeit mit einer gewissen Kraft gegen die Grenzwand desselben; wegen der raschen Aufeinanderfolge und der gleichmäßigen Vertheilung dieser Stöße bringen sie in ihrer Gesammtheit eine Wirkung hervor, die sich als Druck gegen die Wand äußert, den man die Spannung der Luft nennt. Die Größe dieses Druckes gegen die Flächeneinheit hängt sowohl von der Zahl als auch von der Stärke der in der Zeiteinheit auf sie erfolgenden Stöße ab. Es sei nun die Zahl der in dem Volumen v enthaltenen Moleküle $= n$ und der Abstand je zweier benachbarten Moleküle x, so ist $nx^3 = v$, woraus $x^3 = v/n$ und $x = \sqrt[3]{(v/n)}$; die mittlere Geschw. der Moleküle, von welcher sie allerdings innerhalb gewisser Grenzen abweichen können, sei $= c$. Die Häufigkeit der Stöße gegen denselben Punkt in der Zeiteinheit wächst mit der Geschw. und nimmt ab, wie der Abstand der Moleküle zunimmt, ist also proportional zu $c / \sqrt[3]{(v/n)}$; die Zahl der gestoßenen Punkte in der Flächeneinheit aber ist umgekehrt proportional dem Quadrat jenes Abstandes, also proportional zu $1 / \sqrt[3]{(v^2/n^2)}$. Daher ist die Zahl der auf die Flächeneinheit erfolgenden Stöße proportional zu $c / \sqrt[3]{(v^3/n^3)}$ d. h. zu cn/v. Die Wirkung eines Stoßes gegen die Wand ist dargestellt durch seine Größe der Bewegung, da diese den von der bewegten Masse ausgeübten Druck angibt, also durch mc, wo m die Masse des Moleküls bezeichnet; der Druck aller in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit stattfindenden Stöße oder die Spannung ist also gegeben durch den Ausdruck

$$p = C\,(cn/v)\,mc = C\,.\,nmc^2/v,$$ worin C eine constante Größe bedeutet.

Bezeichnen wir den doppelten Werth dieser Constanten ebenfalls mit C, so können wir der vorstehenden Gleichung auch die Gestalt geben

$$pv = C\,.\,n\,.\,{}^1\!/_2\,mc^2$$

d. h. das Product aus Druck und Volumen ist proportional der Zahl der in diesem Volumen vorhandenen Moleküle und der lebendigen Kraft eines einzelnen Moleküls, d. h. kurzweg der gesammten lebendigen Kraft aller Moleküle. Diese Gesammtkraft ist aber nach der neueren Anschauung über die Wärme nichts anderes, als die absolute Temperatur, d. i. die von -273^{0} an gerechnete Temperatur; ist die vom Eispunkt an gerechnete Temperatur $= t$, so ist die absolute Temperatur $= 273 + t$; daher nimmt unsere Gleichung die Form an

$$pv = C\,(273 + t)$$

welche man das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz nennt. Die Constante C bestimmt sich durch die Werthe, welche p und v annehmen, wenn $t = 0$; nennt man diese Werthe p_0 und v_0, so ist $p_0\,v_0 = 273\,C$, woraus $C = p_0\,v_0 / 273$. Setzen wir diesen Werth in das Gesetz ein, so erhalten wir $$pv = p_0\,v_0\,(273 + t) / 273$$ als den vollständigen Ausdruck dieses Gesetzes. So lange t sich nicht ändert, behält auch das Product pv denselben Werth; wenn also p in einem gewissen Maße größer wird, muß v in demselben Verhältnisse kleiner werden und umgekehrt, oder: *die Spannung verhält sich umgekehrt wie das Volumen.* Man nennt diese Wahrheit das Mariotte'sche Gesetz. (Näheres und experimenteller Nachweis in der Lehre von den Luftarten 189.) Wenn das Volumen v constant bleibt, also das Gas eingeschlossen ist, und wenn nun dessen Temperatur erhöht wird, so *wird die Spannung p für jeden Grad um $^1/_{273}$ größer,* welche Wahrheit man das Gay-Lussac'sche Gesetz nennt. In der vollständigen Formel sind beide Gesetze vereinigt enthalten.

Nach der Definition der absoluten Temperatur von Clausius verhalten sich die absoluten Temperaturen zweier Gasarten wie die Summen der lebendigen Kräfte aller in demselben Volumen v enthaltenen Moleküle; wenn daher in diesem Volumen bei dem einen Gase n, bei dem anderen n' Moleküle enthalten sind, und wenn die Geschwindigkeiten und Massen der Moleküle beider Gase bezüglich c, m und c', m' genannt werden, so hat man bei der Voraussetzung gleicher Temperatur für beide die Gleichung

$$n\,.\,{}^1/_2 mc^2 = n'\,.\,{}^1/_2 m'c'^2.$$

Es ist nun sehr wahrscheinlich, und die neueren Theorien der Chemie haben diese Hypothese von Avogadro (1811) beinahe zur Gewißheit erhoben, *daß in gleichen Volumen zweier Gase gleich viele Moleküle enthalten sind,* daß also $n = n'$ ist (s. 60.). Daraus folgt denn, daß bei gleicher Temperatur die lebendigen Kräfte der einzelnen Moleküle verschiedener Gasarten einander gleich sind, weil dann auch ${}^1/_2 mc^2 = {}^1/_2 m'c'^2$ wird. Man ist dadurch im Stande, die molekulare Geschw. aller Luftarten zu berechnen, wenn diejenige einer einzigen bekannt ist. So fand z. B. Clausius durch andere Untersuchungen, auf die einzugehen hier nicht der Ort ist, für welche jedoch Aufg. 66 einen Anhalt bietet, für den Sauerstoff bei 0^0 die große Geschw. von 461^m; d. h. jedes Sauerstoffmolekül legt geradlinig fortschreitend in jeder Sec. einen Weg von 461^m zurück. Nun ist das Molekulargewicht, also auch die Masse des Wasserstoffmol. der 16te Theil von der des Sauerstoffmol.; folglich muß $m\,.\,461^2 = {}^1/_{16}\,m\,.\,c'^2$ sein, woraus $c' = 1844^m$ folgt.

Wenn nun auch nicht alle Moleküle in jedem Augenblicke dieselbe Geschwindigkeit besitzen, sondern sich mehr oder minder auf- oder abwärts von diesem Mittelwerthe entfernen, so ist doch auch dieser letztere nur denkbar unter Voraussetzung großer molekularer Zwischenräume. In diese Zwischenräume einer Luftart können deßhalb die Moleküle einer anderen wegen ihrer großen Geschwindigkeit eindringen, Luftarten können sich in einander ausbreiten. Diese Eigenschaft der Luftarten, daß eine in die andere eindringen kann und muß, nennt man die *Diffusion der Luftarten.* Da nun die Geschwindigkeit der Luftmoleküle, wie aus obiger Rechnung hervorgeht, der Quadratwurzel aus der Masse derselben umgekehrt proportional ist, so ist auch *die Diffusionsgeschw. der Luftarten umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte derselben.*

Aus der Geschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle (c^a. 500^m) hat man durch Betrachtungen, auf welche wir in der Wärmelehre zurückkommen, geschlossen, daß die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Zusammenstößen der Moleküle ein Fünftausendmilliontel einer Secunde beträgt, und daß die durchschnittliche Länge der Bahn jedes Moleküls zwischen zwei Zusammenstößen, also der mittlere Abstand zweier Moleküle ein Hunderttausendtel Centimeter groß ist, woraus es möglich war, den Durchmesser eines Sauerstoffmoleküls auf mindestens fünf Hundertmilliontel Centimeter zu schätzen.

Hört ein äußerer Druck auf eine Luftmasse zu wirken auf, so kehrt dieselbe vermöge ihrer Spannung wieder in ihr früheres Volumen zurück. Auch in diesem Volumen hat indessen die Luft noch eine gewisse Spannung, welche durch die Spannung der umliegenden Luftmassen aufgehoben wird. Würden aber die umliegenden Luftmassen beseitigt, oder was dasselbe ist, würde eine gewisse Luftmenge in einen absolut leeren Raum gebracht, so würde sich dieselbe nach allen Richtungen hin in den leeren Raum ausbreiten und denselben gleichmäßig mit Luft erfüllen. Eben so müßte die ganze irdische Atmosphäre sich in den ganzen Weltraum ausbreiten, wenn sie nicht durch die Anziehung der Erde festgehalten wäre. — Jenes Zurückkehren einer Luftmenge auf ihr früheres Volumen findet indessen nur dann nach aufhörendem Drucke statt, wenn die Luft keine Aggregatzustand-Aenderung erfahren hat. Geht nämlich das Zusammendrücken einer Luftmenge so weit, oder wird den Atomen durch Abkühlung soviel von ihrer lebendigen Kraft entzogen, daß das Ueberwiegen der fortschreitenden Bewegung der Moleküle zu Ende ist, so ist die Luftmasse flüssig geworden, sie ist condensirt. Dadurch unterscheidet man die Luftarten.

Dämpfe und Gase. Dämpfe sind solche Luftarten, welche bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Drucke flüssig werden; Gase dagegen sind diejenigen Luftarten, welche bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Drucke luftförmig bleiben. Zu den ersteren gehören z. B. der Wasserdampf, der Alkoholdampf, der Aetherdampf, zu den letzteren Chlor, Wasserstoff, Kohlendioxyd, Sauerstoff, Stickstoff, also auch die atmosphärische Luft. Viele von den Gasen können durch höheren Druck oder durch starke Abkühlung oder durch Vereinigung beider Methoden condensirt werden; diese werden coërcible Gase genannt; solche sind z. B. Chlor, Kohlendioxyd, Schwefeldioxyd, Flußsäure, Salzsäure, Ammoniak. 55

Zahlreiche Versuche über die Condensation der Gase wurden von Faraday (1845) angestellt; derselbe erzeugte eine künstliche Kälte, welche bis zu — 110° ging. Indem er nun alle Gase einer solchen Kälte aussetzte und mit der Kälte noch einen hohen Druck bis zu 40 Atmosphären verband, gelang es ihm, alle Gase flüssig zu machen, mit Ausnahme von Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd, Stickoxyd und Sumpfgas. Diese von Faraday und seinen nächsten Nachfolgern nicht condensirten Gase wurden permanente oder nichtcoërcible Gase genannt.

Natterer hatte schon 1850 den Druck bis auf 3000^{at} gesteigert, ohne die Condensation dieser Gase erreichen zu können. Spätere Forschungen (s. 425.) haben ergeben, daß überhaupt die Condensation zu erheblichen Flüssigkeitsmengen nur unterhalb einer bestimmten Temperatur geschehen könne, die man den kritischen Punkt nennt. Deßhalb suchten neuere Unternehmungen höchsten Druck mit größter Kälte zu vereinigen. Cailletet in Frankreich und Raoul Pictet in Genf gingen bis zu 500^{at} Druck bei einer nicht ganz bestimmten Kälte; Ersterer erhielt jedoch nur Nebel, Letzterer aber flüssige Strahlen der condensirten Gase, die sich sofort in der Luft wieder lösten. Hiermit war wenigstens die Möglichkeit der Condensation angedeutet. Als Wroblewski u. Olszewski (1883) in Krakau jenen hohen Druck mit einer äußeren, andauernden Kälte von 130 bis 140° vereinigten, erhielten sie Sauerstoff, Stickstoff und Kohlenoxyd als farblose durchsichtige Flüssigkeiten mit deutlicher concaver Oberfläche in einer Capillarröhre, die bei hohem Drucke langsam verdunsteten, bei Verminderung desselben stürmisch kochten. Wasserstoff zeigte nicht einmal nebelige Trübung.

Wenn wir im Vorausgehenden gemäß der neueren Anschauung den Unterschied der Aggregatzustände durch den Unterschied der molekularen Bewegungen erklärt haben, so kann doch nicht behauptet werden, daß der Grund jener Unterschiede ausschließlich hierin liege. Läge der Unterschied nur in der Stärke der Bewegung, so müßten alle Körper gleichen Zustand besitzen, wenn ihre Moleküle dieselbe lebendige Kraft der Bewegung, d. h. wenn die Körper gleiche Temperaturen hätten. Läge der Unterschied nur in der Disgregation, d. h. darin, daß in den festen Körpern die Moleküle einen geringen, in den flüssigen Körpern einen etwas größeren Abstand haben und in den Luftarten sehr weit von einander entfernt sind, was eine einfache Folge der geschilderten molekularen Bewegung sein muß, dann müßten Körper von gleicher Dichte gleichen Zustand haben, Holz müßte flüssig sein, Quecksilber müßte größere Festigkeit als Eisen besitzen. Oder es müßten dann wenigstens diejenigen Körper gleichen Zustand haben, die in gleichem Volumen gleich viele Moleküle enthalten; allein auch dieses ist nicht der Fall. Denn dividirt man die Gewichte gleicher Volumina fester Körper mit ihren Molekulargewichten, so erhält man zwar Zahlen, welche die relative Zahl der Moleküle in gleichen Räumen angeben; aber diese Molekülzahlen sind nicht einander gleich; ebenso wenig ist dies bei den flüssigen Körpern der Fall. Umgekehrt ergeben sich für Schwefel und Quecksilber ungefähr gleiche Molekülzahlen, während dieselben doch einen verschiedenen Zustand haben. — Es kann also der Aggregat-Unterschied weder ausschließlich in der Disgregation, noch in der lebendigen Kraft der Moleküle begründet sein, sondern in der Verbindung dieser beiden Eigenschaften mit der materiellen Beschaffenheit oder dem Stoffunterschiede der Körper. Dieses beweist uns besonders folgende Betrachtung. In den Luftarten sind die Moleküle so weit von einander, daß die Anziehung, also auch der Stoffunterschied keinen Einfluß mehr haben können. Dann hängt aber auch der Zustand nur von dem Abstande der Moleküle ab; denn einige einfache Divisionen zeigen, daß bei den Luftarten dasjenige erfüllt ist, was wir eben bei den flüssigen und festen Körpern vermißten; die Luftarten haben nämlich gleiche Molekülzahlen, in gleichem Volumen gleich viele Moleküle; und jeder Körper, dessen Molekülzahl derjenigen der Luftarten gleich geworden ist, ist auch eine Luftart geworden. Wo also die materielle Beschaffenheit keinen Einfluß mehr haben kann, wie in den Luftarten, bedingt die Disgregation allein den Zustand; in den festen und flüssigen Körpern dagegen wird derselbe durch das Zusammenwirken der materiellen Beschaffenheit und der Disgregation begründet.

56 b. Die chemische Verwandtschaft und die moderne Chemie.

Die chemische Verwandschaft oder Affinität ist die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Atome der Körper an einander haften, und vermöge welcher zwei oder mehrere Körper sich zu einem neuen Körper mit neuen Eigenschaften verbinden.

Das Wesen der chemischen Verwandtschaft ist uns noch unbekannt. Früher hielt man sie für eine besondere, jedem Stoffe eigenthümliche, noch neben der allgemeinen Anziehung vorhandene Attraction, welche in jedem Körper einem anderen Körper gegenüber eine verschiedene Größe, ja sogar unter verschiedenen Umständen eine verschiedene Stärke besitze; bei dieser Ansicht blieb die Kraft unerklärt und viele Erscheinungen blieben räthselhaft. Die elektro-chemische Theorie findet den Grund der chemischen Verbindungen in der entgegengesetzten Elektricität der Bestandtheile, vermöge welcher diese sich anziehen und innig verschmelzen müßten. In neuerer Zeit sucht man die chemischen Erscheinungen durch die Molekularkräfte zu erklären; man bedarf allerdings auch noch der Anziehung der Atome gegen einander, ist aber nicht genöthigt, dieselbe von der allgemeinen Anziehung zu scheiden, da außer dem Zusammenhaften der Atome alle Erscheinungen durch die Bewegungen der Atome und Moleküle erklärt werden.

Man setzt gemäß der neueren Wärmelehre voraus, daß nicht blos die Moleküle in steter Bewegung seien und zwar bei jedem anderen Stoffe in anderer Bewegung, sondern daß auch die Atome eines Moleküls innerhalb desselben schon die mannigfachsten Bewegungen ausführen müßten. Außerdem nimmt man, wie schon erwähnt, an, wozu man durch Wärme-Erscheinungen die triftigsten Gründe hat, daß auch die Elemente aus Molekülen beständen, von denen jedes zwei oder mehrere Atome enthalte. Wenn nun Moleküle verschiedener Stoffe zusammentreffen, so können sowohl die Bewegungen der ganzen Moleküle als auch die der Atome, als auch beide vereint, gemäß den Gesetzen des Stoßes Vertauschungen der Atome und dadurch die Entstehung neuer Moleküle veranlassen, deren Atome alsdann durch die molekulare Anziehung an einander haften. Vermittels dieser neuen, wohl begründeten Annahmen erklären sich folgende früher räthselhaft gebliebenen, allgemeinen chemischen Erscheinungen.

57 a. Die stärkere chemische Wirkung im Zustande des Entstehens oder in statu nascendi. Viele Elemente zeigen im freien Zustande nur schwache Verwandtschaften, verbinden sich aber leicht, wenn sie aus der Masse eines chemischen Processes hervortreten oder entstehen. Im freiem Zustande sind ihre Atome zu Molekülen verbunden; ehe demnach ein Atom eine neue Verbindung eingehen kann, muß erst die Kraft überwunden werden, mit der es von den übrigen Atomen in dem Molekül festgehalten wird; tritt aber das Atom isolirt aus einem chemischen Processe heraus, so steht seiner Verbindung kein Hinderniß entgegen. Der freie Stickstoff verbindet sich mit Wasserstoff sehr schwierig zu Ammoniak, dagegen entsteht diese Verbindung leicht, wenn der Stickstoff aus Salpetersäure austritt. Ebenso verbindet sich der freie Kohlenstoff nur schwer mit Wasserstoff; wird aber das Kohlendioxyd der Luft an den Pflanzenblättern zersetzt, so entstehen leicht die zahlreichen Kohlenwasserstoffe der Pflanzen.

b. Die verbindende Wirkung der Wärme. Da bei höherer Temperatur nicht nur die Bewegungen der Moleküle, sondern auch die Schwingungen der Atome innerhalb derselben viel heftiger werden, so wird die Kraft, mit der die Atome im Molekül an einander hängen, mehr überwunden, die Atome werden mehr losgelöst, vollbringen auch weiter ausgreifende Schwingungen und können dann leichter mit anderen Atomen zusammentreffen und leichter von solchen angezogen werden.

58 c. Die zersetzende Wirkung der Wärme und die Dissociation (Sainte-Claire Deville 1864). Weil bei steigender Temperatur die Bewegung der Atome immer stärker wird, so muß bei ununterbrochenem Steigen endlich ein Punkt eintreten, in welchem die lebendige Kraft eines Atoms die Anziehung der übrigen überwindet, so daß es im Stande ist, sich ganz von denselben zu trennen. Durch hinreichende Hitze werden demnach alle chemischen Verbindungen zersetzt; in der Sonne kann es keine chemischen Verbindungen geben. Da nun nicht anzunehmen ist, daß die bei höherer Temperatur zusammenstoßenden Moleküle regelmäßig zusammenstoßen, so wird die Bewegung der Moleküle und der Atome in verschiedenen Molekülen sehr verschieden sein; in manchen Molekülen können die Atome schon gelöst sein, in anderen nicht. Die Zersetzung der Moleküle wird an einzelnen stark getroffenen Molekülen beginnen und immer mehr zunehmen, bis endlich die Zersetzungs-

temperatur erreicht ist; so fängt die Zersetzung des Wasserdampfes nach Deville bei 1200° an, wird mit steigender Temperatur immer stärker und ist bei 2560° vollständig. Eine solche partielle, mit der Temperatur wachsende Zersetzung nennt man Dissociation. Man kann sogar annehmen, daß jeder Körper immer im Zustande der Dissociation sei, indem es wohl möglich ist, daß irgend ein Atom durch seine Schwingung sein bisheriges Molekül verläßt und zu einem anderen fliegt, von welchem sich dann ein gleiches Atom loslöst.

d. Die entgegengesetzten Reactionen durch die Massenwirkung. Leitet man durch einen glühenden Flintenlauf einen Strom von Wasserdampf, so verbindet sich der Sauerstoff des Wassers mit dem Eisen zu Eisenoxyduloxyd und Wasserstoff wird frei. Leitet man dagegen bei derselben Temperatur über Eisenoxyduloxyd einen Strom von Wasserstoffgas, so verbindet sich der Sauerstoff des Oxyds mit dem Wasserstoff zu Wasser und das Eisen wird frei. Dies sind entgegengesetzte Reactionen durch Wirkungen massenhafter Gasströme; nach der chemischen Verwandtschaft sind dieselben ganz räthselhaft, da im ersten Falle der Sauerstoff größere Verwandtschaft zum Eisen zeigt als zum Wasserstoff, im zweiten aber bei derselben Temperatur größere Verwandtschaft zum Wasserstoff als zum Eisen. Die Dissociation gibt die Erklärung. Im ersten Falle wird Wasserdampf dissociirt, einige Moleküle Wasserdampf zersetzen sich bei der Glühhitze immer, die frei fliegenden Sauerstoffatome können sich in statu nascendi leicht mit dem Eisen verbinden, der Wasserstoff wird aber von dem Dampfstrome fortgeführt. Im zweiten Falle werden immer einige Wasserstoffmoleküle dissociirt, die frei fliegenden Atome derselben können sich mit dem Sauerstoff verbinden zu Wasserdampf, der von dem Gasstrome fortgerissen wird. In einem vollständig geschlossenen Raume entsteht dagegen ein Gleichgewichtzustand zwischen gewissen Mengen Fe^3O^4, Fe, H^2O und H^2.

e. Die einfache Wahlverwandtschaft. Pfaundler, der diese Erklärungen (1867 und 1874) gegeben hat, bezeichnet das Verhalten der auf einander einwirkenden Stoffe eines Gemenges als „Concurrenz der Moleküle", in welchem „Kampf ums Dasein" diejenigen Moleküle den Sieg davontragen, die entweder durch ihre Gasform aus der Concurrenz herausfliegen oder durch ihre Unlöslichkeit niederfallen u. s. w. Bringen wir z. B. Salzsäure und Eisenpulver zusammen, so wird durch die schweren Eisenatome das leichte Wasserstoffatom aus dem Chlorwasserstoffmolekül hinausgestoßen, so daß Chloreisenmoleküle zurückbleiben; die hinausgestoßenen Wasserstoffatome vereinigen sich zu Wasserstoffmolekülen, welche vermöge ihrer großen Geschwindigkeit von 1844^m leicht aus dem Bereiche der Einwirkung wegfliegen, sich zu Gasblasen vereinigen und dadurch in der Flüssigkeit aufsteigen, während die Chloreisenmoleküle in der Flüssigkeit gelöst werden und vieles Eisen unangegriffen zurückbleibt; wenn man durch Erhitzen die Dissociation der Eisenmoleküle unterstützt, so geht der Proceß rascher vor sich. 59

f. Die doppelte Wahlverwandtschaft. Werden Bariumnitrat und Natriumsulfat zusammengegossen, so können durch die fortwährende Dissociation auch Moleküle von Natriumnitrat und Bariumsulfat entstehen. Wären alle 4 Stoffe gleich löslich, also gleich begünstigt, so würde ein gewisser Gleichgewichtzustand zwischen denselben hergestellt werden. Nun ist aber das Bariumsulfat unlöslich, es ist daher dadurch begünstigt, daß irgend einige zusammentreffenden Moleküle durch ihr großes Gewicht zu Boden fallen, also aus dem Kampf ums Dasein herausscheiden. Dann muß durch die fortwährende Dissociation sich wieder der Gleichgewichtszustand herstellen, also wieder Bariumsulfat entstehen, das wieder zu Boden fällt; endlich ist alle Schwefelsäure und alles Barium niedergesunken und es bleibt nur Natriumnitrat übrig. Hiermit ist auch erklärt, wie eine schwächere Säure einer stärkeren ein Metall aus einem Salz wegreißen kann, wenn die erstere eine unlösliche, letztere eine lösliche Verbindung bildet u. s. w.

g. Die prädisponirende Wahlverwandtschaft. Die Chemiker kennen viele Fälle, in welchen die Bildung einer Säure durch Anwesenheit einer Basis befördert wird, mit welcher dann die Säure ein Salz bilden kann. Der Name „Prädisponiren" drückt deutlich die alte Ansicht aus, daß die Wirksamkeit der Basis den Schein eines mit bewußtem Zwecke ausgeführten Handelns an sich trage. Finden sich z. B. in der Nähe einer Mauer faulende thierische Stoffe, so glaubte man, das Vorhandensein des Kalkes bewege den Stickstoff und Sauerstoff der thierischen Stoffe, sich zu Salpetersäure zu verbinden, damit die Basis durch eine Säure gesättigt werde. Wir können diesen Vorgang erklären, indem wir annehmen, daß durch die Molekularstöße auch ohne Anwesenheit der Basis kleine, vielleicht gar nicht nachweisbare Mengen der Säure entstehen, die auch fortwährend wieder zurückgebildet würden. Bei Anwesenheit der Basis wird das Salzbildungsvermögen der Säure mit der ersteren zu einer nützlichen Eigenschaft, indem es die gebundene Säure vor der Rückbildung beschützt und ihre Anhäufung ermöglicht. So entsteht der Mauersalpeter. (Pfaundler 1874).

h. Das Avogadro'sche Gesetz (1811). Nach den oben angegebenen Grundansichten der modernen Chemie sind die Moleküle die kleinsten, frei existirenden Mengen der Stoffe, die Atome aber die kleinsten in Verbindung vorhandenen Mengen der Elemente. Bekanntlich besteht nun das Charakteristische der chemischen Verbindungen darin, daß die Stoffe sich nur 60

in ganz bestimmten Gewichtsmengen mit einander verbinden; so verbindet sich immer ein Gewichtstheil Wasserstoff mit 8 Gewichtstheilen Sauerstoff zu Wasser. Man erklärt dies durch die Annahme, daß die Atome untheilbar und von bestimmtem Gewichte sind, und sich nur in ganzen Atomen an einander lagern können. Wieviele Atome aber sich mit einander zu einem Molekül verbinden, und wieviel die Atome sich in ihrem Gewichte unterscheiden, ist durch jene Verbindungsgewichte noch nicht festgestellt; so könnte z. B. Wasser aus 1 Atom O und 1 Atom H bestehen, wenn das O-Atom das 8fache Gewicht des H-Atoms hätte; es könnte auch aus 2 At. O und 1 At. H bestehen, in welchem Falle das O-Atom das vierfache Gewicht des H-Atoms haben müßte; auch aus 1 At. O und 2 At. H könnte es bestehen; dann müßte aber das O-Atom das 16fache Gewicht des H-Atoms besitzen. Die regelmäßigen Verbindungsgewichte geben daher wohl einigen, aber keinen sicheren Anhalt über das Verhältniß der Atomgewichte zu einander. Nun hat man aber noch andere Mittel, die specifische Wärme, den Isomorphismus und andere chemische Erscheinungen, welche über das Verhältniß der Atomgewichte zu einander Aufschluß geben; man hat so gefunden, daß das Wasserstoffatom das leichteste aller Atome ist, daß 1 Sauerstoffatom das 16fache, ein Chloratom das 35fache, 1 Fluoratom das 19fache, 1 Bromdampfatom das 80fache, 1 Joddampfatom das 127fache Gewicht des Wasserstoffatoms besitzt, welche Zahlen man bekanntlich Atomgewichte nennt. Vergleicht man nun mit diesen Atomgewichten die spec. Gewichte der Gase, vorausgesetzt, daß dieselben auf das spec. Gew. des Wasserstoffs = 1 bezogen sind, so findet man, daß die spec. Gew. den Atomgewichten gleich sind. Die Atomgewichte sind nun allerdings nicht die Gewichte der kleinsten, frei existirenden Mengen; diese sind vielmehr die Molekulargewichte, welche bei den Elementen, deren Moleküle aus 2 Atomen bestehen, doppelt so groß als die Atomgewichte sind, also $H^2 = 2$, $O^2 = 32$ u. s. w.; es sind also die Molekulargewichte doppelt so groß als die spec. G. Bezieht man dieselben aber auf $H^2 = 1$, so stimmen sie ebenfalls mit den spec. G. überein. Dies ist nur dadurch erklärlich, daß **gleiche Volumina verschiedener Gase dieselbe Anzahl von Molekülen enthalten**; denn wenn ein Sauerstoffmolekül das 16fache Gewicht des Wasserstoffmoleküls hat, und wenn ein Liter Sauerstoff das 16fache Gewicht eines Liters Wasserstoff besitzt, so müssen in den beiden Litern gleich viele Moleküle enthalten sein, womit der Satz von Avogadro abgeleitet ist.

61 i. **Die Regelmäßigkeit der Volumverbindungen der Gase.** Ein Liter Chlor verbindet sich nicht mit $^1/_2$ oder $^1/_3$ oder $^1/_{10}$, sondern mit 1^l Wasserstoff und zwar entstehen hierbei 2^l Salzsäuregas. In ähnlicher regelmäßiger Weise geschehen alle Verbindungen von Gasvolumina. Dies erklärt sich einfach aus den zwei Avogadro'schen Hypothesen; auch die Hypothese, daß die Elemente nicht in Atomen, sondern in Molekülen frei existiren, rührt nämlich von Avogadro her. Mengt man 1^l Chlor mit 1^l Wasserstoff, so sind gleichviel Chlormoleküle und Wasserstoffmoleküle vorhanden. Aus jedem Wasserstoffmolekül tritt ein Wasserstoffatom und wird durch ein Chloratom ersetzt, dessen Weggang aus seinem Molekül durch das Wasserstoffatom ersetzt wird; es entstehen also ebenso viel Chlorwasserstoffmoleküle als Chlor- und Wasserstoffmoleküle vorhanden waren, also ebenfalls 2^l. In anderen Fällen findet bei der Verbindung eine regelmäßige Verdichtung statt; so verbindet sich 1^l Sauerstoff mit 2^l Wasserstoff zu 2^l Wasserdampf; die Erklärung dafür ist ebenso einfach. Wasser ist H^2O; 1^l Sauerstoff enthält ebenso viel Atome, als die 2^l Wasserstoffmoleküle; es kann daher zu jedem Wasserstoffmolekül ein Sauerstoffatom treten und dadurch ebenso viele Wassermoleküle bilden, als Wasserstoffmoleküle vorhanden waren, so daß 2^l Wasserdampf entstehen müssen. In ähnlicher Weise bilden 3^l Wasserstoff mit 1^l Stickstoff 2^l Ammoniakgas $= NH^3$; jedes Molekül Stickstoff spaltet sich in 2 Atome und verbindet sich mit 3 At. Wasserstoff zu 1 Molekül Ammoniak; es entstehen ebenso viel Ammoniakmoleküle, als Stickstoffatome vorhanden waren, also 2^l; 4^l werden hier auf 2^l verdichtet.

62 k. **Die abnormen Dampfdichten.** Manchmal kommt es vor, daß das sp. G. eines Dampfes nicht gleich dem Atomgewichte ist. Diese abnormen Dampfdichten erklärt man dadurch, daß der Dampf sich in mehrere Dämpfe zersetzt hat, oder daß seine Moleküle sich gespalten oder vereinigt haben. So ist z. B. das sp. G. von Schwefeldampf bei $1000^0 = 32$, gleich dem Atomgewichte; also besteht bei 1000^0 das Schwefelmolekül aus 2 Atomen, wie bei allen Luftarten, deren sp. G. mit dem Atomgewichte stimmt. Bei 500^0 ist aber die Dampfdichte $= 96$. Dies erklärt sich durch die Annahme, daß in dem Schwefel von 500^0 statt 2 Atomen in jedem Molekül 6 Atome vorhanden sind. Wird nun Schwefel von 500^0 an erhitzt, so bleibt die Dampfdichte bis 700^0 constant, dann nimmt sie stetig ab, offenbar weil jetzt die Dissociation der 6atomigen Schwefelmoleküle beginnt, und erst bei 1000^0 wird sie wieder constant, weil dann die Spaltung der Moleküle beendigt ist. Ein anderes Beispiel ist das Phosphorchlorid PCl^5, dessen Dampfdichte bei niederer Temperatur $= 104$ ist; bei höherer Temperatur nimmt die Dampfdichte allmälig ab, weil eine Dissociation in Phosphorchlorür PCl^3 und Chlor Cl^2 stattfindet, was aus dem allmäligen Gelbwerden des anfänglich farblosen Dampfes ersichtlich ist; endlich bei 336^0 ist die Zersetzung

vollendet, es sind 2 Volumina Phosphorchlorür und Chlor entstanden; deßhalb ist das sp. G. des Dampfes nur noch halb so groß.

1. Die allotropischen Modificationen. Schwefel, Selen, Phosphor, Arsen, Kohlenstoff, Silicium treten als Elemente in ganz verschiedenen Zuständen auf, in welchen sie verschiedene physikalische, ja sogar verschiedene chemische Eigenschaften haben. Für den Schwefel erfuhren wir schon die Neigung, bei höherer Temperatur seine Moleküle zu spalten, bei niedriger sie zu vereinigen; so enthält möglicherweise das Molekül des festen Schwefels noch mehr als 6 Atome, und die verschiedenen Vorkommnisse desselben, die sogenannten allotropischen Modificationen unterscheiden sich wohl durch die Zahl der Atome in einem Molekül. Auch der Sauerstoff tritt in 2 Modificationen, als gewöhnlicher und als activer Sauerstoff oder Ozon auf, in welch letzterem die Verwandtschaften zu besonders hohem Grade gesteigert erscheinen. Man erklärt dies mittels der Annahme, welche durch die Verdichtung bei der Ozonisirung gerechtfertigt wird, daß in jedem Ozonmolekül 3 Sauerstoffatome statt 2 vorhanden sind, daß zwei dieser Moleküle gegenseitig ihre Affinität sättigen und daher das 3te nur mit geringer Kraft festhalten, weßhalb dieses stärker oxydirend wirken kann. Die stärkere Wirkung des von der Sonne beschienenen Chlors und des im Palladium condensirten Wasserstoffs schreibt man ebenfalls einer solchen activen Erregung zu.

Bei der neueren Erklärung der chemischen Vorgänge wird von besonderer Wichtigkeit die große Leichtigkeit und außerordentliche Geschwindigkeit des Wasserstoffatoms, welche bekanntlich 1844^{m} erreicht. Vermöge der ersteren kann es durch jedes andere Atom aus seiner Lage gestoßen werden, und vermöge der letzteren wird es in einem Augenblick so weit von derselben entfernt, daß eine Rückkehr unmöglich ist. Demgemäß werden die meisten chemischen Processe jetzt als Verdrängungen des Wasserstoffs, als Substitutionen von Wasserstoffatomen durch andere Atome erklärt.

So wird z. B. der bekannte Proceß der Wasserstoffbereitung oder der Zersetzung von gesäuertem Wasser durch Zink so dargestellt, daß das Zink an die Stelle des Wasserstoffs der Schwefelsäure tritt, wodurch Zinksulfat entsteht und Wasserstoff frei wird.

c. Die Cohäsion.

Die Cohäsion (cohaereo, zusammenhängen) ist die Kraft, mit welcher die Theilchen eines und desselben Körpers zusammenhaften; sie ist am größten bei den festen Körpern, nahezu gleich Null bei den flüssigen Körpern, und gar nicht vorhanden d. h. weit überwogen durch die molekulare Abstoßung bei den luftförmigen Körpern; denn bei den festen Körpern sind die Massentheilchen einander sehr nahe, bei den flüssigen etwas weiter auseinander. Die Cohäsion wird vergrößert durch alle Mittel, welche die Dichtigkeit eines Körpers erhöhen: Messing wird durch Hämmern 3 mal fester, Tücher, Zeuge, Papier, Leder erhalten durch Pressen ihre Festigkeit, Stahl ist dichter und daher härter als Eisen. Die Massentheilchen sind auch sehr verschieden in ihrer Gestalt und Größe und können die verschiedensten Stellungen gegen einander haben; daher muß die Cohäsion ein sehr verschiedenartiges Auftreten zeigen, und diese Verschiedenheit muß um so größer sein, je mehr die Cohäsion zur Geltung kommt; demnach findet man an den festen Körpern die verschiedensten Cohäsions-Erscheinungen. Haben z. B. die Theilchen eine vorwiegende Ausbildung nach der Länge, so wird die Cohäsion in dieser Richtung groß sein, die Theilchen werden sich in dieser Richtung fester an einander setzen als in der dazu senkrechten Richtung; so finden wir die Hölzer in der Richtung ihrer Fasern fester als in jeder anderen; auch die Krystalle zeigen nach verschiedener Richtung eine verschieden große Cohäsion u. s. w. 63

Körper, die in einzelnen Richtungen große, in anderen Richtungen geringe Cohäsion besitzen, können in den letzten Richtungen oft bedeutende Veränderungen erleiden, ohne ihren Zusammenhang zu verlieren. Kann man Körper durch eine Zugkraft stark ausdehnen, ohne den Zusammenhang zu stören, so werden diese Körper zähe genannt; Kautschuk, geschmolzenes Glas, weiches Pech, organische Faserbündel sind zähe. Lassen sich die Körper durch Druck, Stoßen, Schlagen u. s. w. stark ausdehnen, ohne ihren Zusammenhang zu verlieren, so nennt man sie dehnbar, hämmerbar, geschmeidig u. s. w.; Gold Platin, Silber, Eisen, Kupfer, Zinn, Blei u. s. w. besitzen diese Eigenschaft; die ersteren sind auch noch zähe, lassen sich daher zu feinem Drahte ausziehen (der Wollaston'sche Pla-

tindraht); die zwei letzteren dagegen sind nicht zähe: Bleiblech und Stanniol reißen wie Papier; dagegen ein Kupferdraht von 1mm Durchmesser trägt 26kg. — Lassen sich die Theilchen eines Körpers beim Eindringen in dessen Oberfläche nur schwer aus ihrer Lage bringen, so ist der Körper hart; die härtesten Körper sind Iridium, Diamant, krystallisirtes Bor und Silicium. Die Metalle besitzen im reinen Zustande keine bedeutende Härte, werden aber durch Zusammenschmelzen mit anderen Metallen oder Kohle härter. Härte darf nicht mit Festigkeit verwechselt werden; sie ist der Widerstand gegen das Eindringen an der Oberfläche, während Festigkeit der Widerstand gegen die Trennung der Theile im ganzen Körper ist. Leder hat große Festigkeit, aber geringe Härte. Der weiche Zustand ist dem flüssigen nahe, tritt daher beim Vermischen von festen, gepulverten Massen mit flüssigen oder beim allmäligen Herannahen des flüssigen Zustandes ein. Weiche Körper können doch zähe sein, wie geschmolzenes Glas, das sich in die dünnsten Fäden ausziehen läßt. Die Theilchen lassen sich aus ihrer Lage bringen, ohne den Zusammenhang einzubüßen. Guthrie (1865) unterscheidet auch bei den Flüssigkeiten Steifigkeit (stubborn cohesion) und Festigkeit (persistent cohesion), wie man bei den festen Körpern Zähigkeit und Härte unterscheidet; bei Quecksilber überwiege die Steifigkeit, bei Alkohol die Festigkeit. — Spröde ist ein Körper, wenn er bei der geringsten Gestaltänderung den Zusammenhang seiner Theilchen aufgibt. Die sprödesten Körper sind Glasthränen und Bologneser Flaschen, welche aus rasch abgekühltem Glase bestehen; das Abbrechen der Spitze verwandelt die ersteren in Pulver, und dies geschieht mit solcher Heftigkeit, daß eine mit Wasser gefüllte Flasche zerspringt, wenn eine Glasthräne im Wasser abgebrochen wird. Durch einen leichten Ritz zerfallen die Bologneser Flaschen in viele Stücke. Die Sprödigkeit des Glases wird wesentlich vermindert, wenn es bis zur schwachen Rothgluth erwärmt und nach de la Bastie (1874) in ein 300° warmes Bad von Oel, Fett, Harz u. s. w. eingetaucht oder nach Friedr. Siemens einer starken Pressung ausgesetzt wird. Dieses Hartglas oder Preßhartglas hat nicht blos geringere Sprödigkeit, sondern auch geringere Empfindlichkeit gegen plötzliche Temperaturänderungen, größere Härte und Festigkeit gegen Druck, Zug und Stoß wie das gewöhnliche Glas; auch ist sein spec. Gew. also auch seine Dichte größer, wodurch seine Eigenschaften erklärlich scheinen. Spröde Metalle sind Arsen, Wismuth und heißes Zink, die sich leicht zu Pulver zerstoßen lassen. Merkwürdig ist der große Einfluß des geringen Kohlenstoffgehaltes verschiedener Eisensorten; Gußeisen (mit ca. 5% C) ist hart und spröde, Schmiedeeisen (mit höchstens 2/3% C) ist weich, zähe und dehnbar, Stahl (mit 1/2—2% C) ist hart, zähe, dehnbar und das schärfste Gegentheil von spröde, nämlich elastisch. Elastisch ist ein Körper, wenn er bei Gestaltänderungen den Zusammenhang behält und nach Aufhören der Einwirkung in die frühere Gestalt zurückkehrt. Diese Eigenschaft ist von allen Cohäsionseigenschaften bei weitem die wichtigste, sowohl in der Anwendung als zur Erkenntniß der inneren Beschaffenheit der Stoffe; wir sehen daher die bedeutendsten Experimentatoren und mathematisch-physikalischen Forscher um die Ergründung dieser Eigenschaft bemüht.

64 **Die Elasticität.** Die Elasticität (von ἐλαύνω treiben) ist die Eigenschaft, daß ein Körper durch eine äußere Kraft seine Gestalt ändern kann, ohne den Zusammenhang zu verlieren, und daß er beim Aufhören der Kraftwirkung wieder in seine frühere Gestalt zurückkehrt.

Kautschuk kann man aus einander ziehen, Guttapercha in alle nur denkbaren Gestalten drücken, dünne Stahlstreifen lassen sich spiralförmig zusammenrollen, Fischbeinstäbe stark krumm biegen, Luft läßt sich auf ein kleines Volumen zusammenpressen u. s. w.; beim Nachlassen der wirkenden Kraft aber kehren die genannten Körper wieder in ihre frühere Form zurück. Die Ursache der Rückkehr kann man verschiedenartig auffassen. Gibt man zu, daß die Anziehung langsamer ab- und zunimmt als die Abstoßung, so überwiegt beim Auseinanderziehen der Körpertheile die Anziehung und führt dieselben zurück, während beim Annähern derselben die Abstoßung überwiegend wird und die Rückkehr veranlaßt. Man kann auch die Arbeit zur Erklärung benutzen; beim Annähern theilt man den Molekülen Arbeit mit, die ihre lebendige Kraft vergrößert und ihnen daher den größeren Rückweg möglich macht; beim Entfernen der Moleküle verwandelt sich die mitgetheilte Arbeit in Spannkraft, welche die Rückkehr vollbringt.

Im gewöhnlichen Leben nennt man vorzugsweise solche Körper elastisch, welche, wie die eben angeführten, durch eine geringe Kraft schon eine große Aenderung erfahren. Genauere Untersuchungen haben indeß gezeigt, daß alle Körper elastisch sind; nur besitzen die flüssigen und luftförmigen Körper diese Eigenschaft nicht allen Kräften gegenüber. Die luftförmigen Körper dehnen sich nämlich nach Beseitigung eines äußeren Druckes wieder aus, sind also gegen eine Druckkraft elastisch; aber eine Zugkraft ist an denselben nicht anzubringen; wenn man jedoch durch eine solche

Kraft das Volumen eines Gases vergrößert hat, so folgt das Gas zwar in das neue Volumen, allein es kehrt nicht von selbst wieder in sein früheres Volumen zurück. Auch die flüssigen Körper verhalten sich einer Druckkraft gegenüber elastisch, was schon aus dem Zurückspritzen auffallender Tropfen und aus dem Ricochettiren zu erkennen ist; sie lassen sich auch durch Wärme ausdehnen, aber nicht durch eine Zugkraft. Die festen Körper dagegen offenbaren ihre Elasticität sowohl einer Druckkraft als auch einer Zugkraft gegenüber. Daß wirklich selbst die härtesten festen Körper diese Eigenschaft besitzen, kann man einfach durch einen Versuch mit Kugeln von Elfenbein, Metall u. s. w. zeigen, die man auf eine glatte mit Ruß überzogene Platte, etwa von Marmor fallen läßt; die Kugeln zeigen dann nicht punktförmige, sondern kreisförmige Flecke, die um so größer sind, je höher die Kugeln herabfielen; hierdurch ist dargethan, daß dieselben im Momente der Berührung zusammengedrückt waren.

Wenn wir sonach die Eigenschaft der Elasticität auch bei solchen Körpern wahrnehmen, die dem gewöhnlichen Blicke unelastisch erscheinen, so ergibt eine noch nähere Untersuchung, daß die Kraft der Elasticität gerade bei diesen Körpern am größten ist. Die Elasticität ist bekanntlich eine Spannkraft, wird also eigentlich durch Arbeit gemessen; indessen übt sie wie jede Spannkraft einen Druck oder Zug aus und zwar auf dem bekannten Wege, auf welchem der Körper in seine frühere Gestalt zurückkehrt; das Wesentliche und Unbekannte ist jener Druck oder Zug. Unter Kraft der Elasticität verstehen wir daher den Druck oder Zug, durch und mit welchem die aus ihrer Lage gebrachten Theilchen in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren; dieser Druck oder Zug ist gleich dem Widerstande, mit welchem der Körper einer weiteren Aenderung seiner Form, einer weiteren Verschiebung seiner Theilchen entgegenwirkt; und dieser Widerstand ist nach dem Satze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" derjenigen äußeren Kraft gleich, welche die Veränderung hervorgebracht hat. Wäre die Elasticität kleiner wie die äußere Kraft, so würde diese noch eine weitere Aenderung bewerkstelligen können; wäre die Elasticität größer, so würde sie einen Theil der Aenderung aufheben; also ist bei dem erreichten Grade der Aenderung die Elasticität gleich der äußeren Kraft. Demnach gibt über die Größe der Kraft der Elasticität, oder kürzer über die Größe der Elasticität diejenige Kraft Aufschluß, welche in verschiedenen Körpern eine und dieselbe Aenderung hervorbringt, welche also z. B. alle Körper auf die Hälfte ihres Volumens zusammenpreßt oder die Länge eines Körpers verdoppelt u. dergl. mehr.

Diese Kraft ist am kleinsten bei den Luftarten; sie ist bei den Flüssigkeiten bedeutend größer als bei den Luftarten und selbst bei vielen festen Körpern. So ist sie z. B. beim Quecksilber größer als bei Kautschuk, Leder, Glas, Fischbein, Holz und Stein; nur in den schweren Metallen, Blei ausgenommen, ist sie größer als im Quecksilber. Platin, Kupfer, Messing, Schmiedeeisen, Stahl besitzen die größte Kraft der Elasticität, Luft und Kautschuk die kleinste. Dieses Resultat über die Kraft der Elasticität widerspricht der gewöhnlichen Anschauung nur scheinbar; denn diejenigen Körper, welche nur geringe Kraft der Elasticität besitzen, also der Aenderung nur einen geringen Widerstand entgegensetzen, wie Luft und Kautschuk, können auch schon durch eine kleine Kraft eine große Aenderung erfahren und haben gewöhnlich die Eigenschaft, eine große Aenderung erleiden zu können, ohne die Fähigkeit der vollkommenen Rückkehr in die frühere Form einzubüßen; diese Körper erscheinen dem gewöhnlichen Sinne als sehr elastisch. Diejenigen Körper aber, welche die Kraft der Elasticität in hohem Maße besitzen, also der Aenderung einen großen Widerstand entgegensetzen, wie Platin, Kupfer, Elfenbein u. s. w., bedürfen auch einer sehr bedeutenden Kraft zur Aenderung, erscheinen also für die Kräfte der Menschenhand unveränderlich oder wenig elastisch; diese Körper können auch meistens eine große Aenderung nicht ertragen; sie kehren nach einer solchen gar nicht oder nicht vollkommen in die frühere Gestalt zurück. Die Wissenschaft faßt diesen Unterschied durch die Begriffe der vollkommenen Elasticität und der Elasticitätsgrenze.

Man nennt einen Körper vollkommen elastisch, wenn er nach einer Aenderung genau wieder in seine vorige Gestalt zurückkehrt, und versteht unter Elasticitätsgrenze den Betrag der Veränderung, welche ein Körper erfahren darf,

ohne die Fähigkeit der vollkommenen Wiederherstellung zu verlieren. *Innerhalb der Elasticitätsgrenze sind also alle Körper vollkommen elastisch.* Nur ist bei den meisten Körpern die Elasticitätsgrenze sehr eng gezogen; und gerade diejenigen Körper, welche große Kraft der Elasticität haben, welche sich also auch nur durch große Kräfte verändern lassen, besitzen meist sehr enge Elasticitätsgrenzen; sie können keine großen Aenderungen erleiden, ohne daß dieselben ganz oder theilweise bleibend werden. Die Körper dagegen, wie Luft, Kautschuk, Fischbein, Holz, welche sich schon durch eine kleine Kraft ändern lassen, welche also geringe Elasticität besitzen, haben eine sehr große Elasticitätsgrenze, können also große Veränderungen ertragen, ohne die Fähigkeit der vollkommenen Rückkehr zu verlieren.

Dies zeigt deutlich die Betrachtung der Tabelle in 75. Dort ist in der zweiten Colonne unter Elasticitätsmodul die Kraft angegeben, welche einen Körper doppelt so lang oder doppelt so kurz zu machen im Stande ist, und in der ersten Colonne unter Tragmodul die kleinste Kraft, welche zuerst eine bleibende Aenderung von $^{1}/_{2}$mm erzeugt. Wenn also durch 20 000kg ein schmiedeeiserner Stab um seine Länge vergrößert wird, so wird er durch 15kg (nach dem ersten Gesetze in 65.) um $^{1}/_{1350}$ ca. größer. Das Schmiedeeisen darf also nur um $^{1}/_{1350}$ geändert werden, so erfährt es schon eine bleibende Aenderung von $^{1}/_{2}$mm, während seine Kraft der Elasticität 20 000kg beträgt. Das Fischbein aber, das nur eine Elasticität von 700kg besitzt, erfährt erst durch 5kg diese bleibende Aenderung; die geringste bleibende Aenderung, die Elasticitätsgrenze, beträgt $^{1}/_{140}$, ist also viel größer als beim Schmiedeeisen. Nur Stahl hat einen sehr großen Elasticitätsmodul neben einer ziemlich großen Elasticitätsgrenze und steht hierdurch allen Metallen voran. Je spröder ein Körper ist, desto kleiner ist seine Elasticitätsgrenze. Merkwürdig ist auch hierin das Glas; Glasthränen und Bologneserflaschen haben die größte Sprödigkeit; auch gewöhnliches Glas hat noch ziemlich enge Grenzen, innerhalb derselben aber große Elasticität, so daß Glasflächen sich biegen und schwingen können, wie die *Glastrompeten* beweisen; in Form der *Glasfäden* (Glaswolle und Schlackenwolle) aber besitzt das Glas sehr weite Grenzen. Die weitesten Grenzen, wenn auch den kleinsten Modulus, besitzen die Luftarten, insbesondere die permanenten; sie können 100fach zusammengedrückt werden, ohne die Fähigkeit der Rückkehr einzubüßen. Die Flüssigkeiten besitzen gegen Druck einen großen Modulus; eben deßwegen sind ihre Grenzen, die sehr weit zu sein scheinen, noch nicht erforscht, weil man die zu so starken Pressungen nöthigen Kräfte nicht auftreiben kann. Sie sind den festen Körpern auch darin überlegen, daß sie selbst den längst dauernden Kräften gegenüber die Fähigkeit der Rückkehr in ihr früheres Volumen nicht einbüßen, also permanente Elasticität haben.

Die Elasticität hat zahlreiche Anwendungen; die des Korkes verschließt Flaschen, die der Stahlfedern bewegt Uhren, Thürklinken, Schloßriegel, Thüren, Telegraphenhebel u. s. w., sie dient zu Kraftmessern und Federwagen, wird zum Tragen in Polstern, zum Schwächen der Wagenstöße u. s. w. verwendet. Die Elasticität der Luftarten findet Verwendung in Luftkissen, Windbüchsen, Feuerspritzen u. s. w., sie ist die Ursache der meisten Explosionen, der Wirkung des Schießpulvers, so wie auch Bogen und Ballisten auf der Elasticität beruhen. Zahllose Naturerscheinungen wären ohne die Elasticität nicht vorhanden; das Abprallen der Körper von einander beim Stoße, die Fortpflanzung des Stoßes, die Schwingungen der Theile und Theilchen aller Körper, also die Erscheinungen des Schalles, des Lichtes, der Wärme u. s. w. sind nur durch die Elasticität möglich. Bei der Bildung der Gletscher wirkt die Elasticität und Biegsamkeit des Eises mit. Eis, das bei niederen Temperaturen vollkommen spröde ist, läßt sich nach Bianconi 1876 und nach Fabian 1878 dehnen und biegen, ohne zu brechen, und kehrt in die frühere Gestalt zurück, wenn die Lufttemperatur etwas über dem Eispunkte liegt.

In neuerer Zeit sind die Gesetze der Elasticität auch für die Technik wichtig geworden. Es ist schon seit längerer Zeit bekannt, daß zwar die flüssigen und luftförmigen Körper permanente Elasticität besitzen, daß aber die festen Körper unter andauernder Belastung ihre Gestalt bleibend ändern, sogar wenn diese Belastung nicht diejenige der Elasticitätsgrenze erreicht. So verlieren Stahlfedern allmälig ihre Kraft, Deckenbalken ziehen sich krumm u. s. w. Da nun die meisten Bau- und Maschinenelemente dauernde Belastungen auszuhalten haben, und da die Festigkeitsverhältnisse der geänderten Formen ganz andere als die der ursprünglichen Formen sind, auf deren Unveränderlichkeit bei der Erbauung doch gerechnet und berechnet wird, so wurde von Reuleaux und Moll (1854) folgender Satz aufgestellt: die Belastung der Bau- und Maschinentheile darf nur einen gewissen Bruchtheil der Belastung für die Elasticitätsgrenze betragen, darf also dieselbe nicht erreichen und noch weniger oder höchstens bei Probeversuchen über dieselbe hinausgehen. Die Technik hat diesen Satz ziemlich allgemein angenommen. Es ist daher die Belastung für die Elasticitätsgrenze, welche

Weisbach und Reuleaux **Tragmodul** nennen, und welche auch für die Elasticitätsgrenze selber gelten kann, für die Technik von Bedeutung. Man ist übereingekommen, den Tragmodul durch das Gewicht in kg auszudrücken, das einem Stabe von 1^m Länge und 1^{qmm} Querschnitt eine bleibende Verlängerung von $^1/_2{}^{mm}$ zu ertheilen vermag; dieses Gewicht beträgt z. B. für zu Draht gezogenen Gußstahl 65^{kg}, sinkt aber durch Glühen des Stahles bis auf 5^{kg} herab, was darauf hinweist, daß Gluth die molekulare Beschaffenheit der Körper ändert; indessen ist bei anderen Körpern die Abnahme nicht so stark als bei Gußstahl. Die Tabelle in 75. enthält die Tragmodeln einiger Körper nach Wertheim u. A.

65 **Zug- und Druckelasticität.** Nach der Art der Belastung unterscheidet man: Zug-Elasticität, wenn die Belastung den Körper zu verlängern strebt; Druck-Elasticität, wenn die Belastung den Körper zusammendrückt; Biegungs-Elasticität, wenn der Körper an einem Ende befestigt oder an beiden Enden unterstützt ist, und eine Kraft senkrecht zu seiner Länge wirkt; Torsions- oder Drehungs-Elasticität, wenn der Körper verwunden oder verdreht z. B. an beiden Enden nach entgegengesetzten Richtungen gedreht wird; Schub-Elasticität, wenn eine Kraft auf den Körper z. B. in einem Querschnitte wirkt, die ihn zu verschieben oder abzuschieben oder abzuscheeren strebt. Für den Zug und Druck ergeben sowohl die genauesten Versuche, als auch die Theorie das Grundgesetz (Hooke 1679, ut tensio sic vis): **Die Verlängerung oder Verkürzung steht innerhalb der Elasticitätsgrenze im geraden Verhältnisse zu der Belastung und der Länge des Körpers und im umgekehrten Verhältnisse zum Querschnitte desselben.** Außerdem hängt die Größe der Formänderung noch von der Kraft der Elasticität ab, also von der materiellen Beschaffenheit des Körpers. Bezeichnen wir den hierdurch ausgeübten Einfluß durch einen Coëfficienten E, Länge, Querschnitt und Belastung entsprechend mit l, q und P, so ist die Formänderung

$$\lambda = E . l P / q \qquad (13)$$

Setzen wir hierin $q = 1^{qmm}$ und $P = 1^{kg}$, so ist $\lambda = E . l$, woraus sich ergibt $E = \lambda / l$. — Der Coëfficient E gibt also an, welchen Bruchtheil der ganzen Länge die Aenderung beträgt, wenn auf einen Stab von 1^{qmm} Querschnitt eine Zug- oder Druckkraft von 1^{kg} wirkt. Man nennt diese für Stäbe von demselben Material constante Zahl den **Elasticitäts-Coëfficient.** Dieser ist nur ein sehr kleiner Bruch, gibt also keinen augenfälligen Maßstab für die Kraft der Elasticität. Man hat daher den reciproken Werth von E, der jedenfalls eine große Zahl ist, also den Bruch $^1/E$ als Maß für die Kraft der Elasticität eingeführt und diesen Werth **Elasticitäts-Modul** genannt und mit m bezeichnet. Derselbe gibt auch eine sehr treffende Anschauung für die Kraft der Elasticität. Denn man erhält denselben aus der Formel (13), wenn man dort q = 1 und $\lambda = l$ setzt; alsdann hat man $l = E . l O$, woraus $P = {}^1/E = m$. — Also ist der Elasticitäts-Modul m diejenige Kraft, welche einen Stab von 1^{qmm} Querschnitt um seine eigene Länge unter Voraussetzung vollkommener Elasticität bis dahin auszudehnen vermöchte. Derselbe läßt sich natürlich nicht direct beobachten, weil kein Stab sich so weit ausdehnen läßt, ohne zu reißen; er läßt sich aber nach Formel (13) aus jeder genauen Beobachtung leicht berechnen. Die Tabelle in 75. enthält die Elasticitäts-Modeln verschiedener Körper.

Bei der Verlängerung oder Verkürzung eines Stabes bleibt der Querschnitt nicht ungeändert, sondern er verkleinert oder vergrößert sich; jedoch verändert sich der Querschnitt nicht etwa in dem Maße, daß das Volumen des Stabes ungeändert bleibt; vielmehr hat schon Poisson (1829) theoretisch gefunden, daß die Volumänderung etwa $^1/_2$ der Längenänderung betrage und daraus geschlossen, daß die Aenderung des Radius $^1/_4$ der Längenänderung ausmache. Wertheim stellte Versuche (1848) an, und fand für dieses **Verhältniß** μ **der Quercontraction zur Längendilatation** den größeren Werth $^1/_3$. Neuere Untersuchungen von Kirchhoff (1859), von Okatow (1863) und von Schneebeli (1870) ergaben, daß μ zwar für einen und denselben Stoff von den Dimensionen des Stabes unabhängig sei, sich jedoch mit dem Zustande des Stabes ändere und auch für verschiedene

Stoffe, entgegen Poissons Meinung, Verschiedenheiten von allerdings geringer Bedeutung darbiete; die Größe von μ ist nach diesen Versuchen etwa 0,3. Röntgen fand 1876 für Kautschuk $\mu = 0{,}5$, Naccari und Bellati 1878 $\mu = 0{,}4$. — Auch der Elasticitätsmodul eines Körpers ist nicht ganz constant; so fand schon Kupfer (1856), daß derselbe nicht unabhängig von der Temperatur sei, sondern z. B. beim Eisen mit steigender Temperatur abnehme. Kohlrausch und Loomis (1870) untersuchten diese Aenderung mit der Temperatur genauer und fanden sie stärker, als die Aenderung der Ausdehnbarkeit und des Lichtbrechungsvermögens durch die Wärme, kleiner als die Aenderung des galvanischen Leitungswiderstandes, und gleich der Aenderung des permanenten Magnetismus und der specifischen Wärme; auch nimmt die Größe der Abnahme mit der Temperatur zu, ähnlich wie der Ausdehnungscoëfficient. Viele Metalle haben mehrfache Elasticitätsgrenzen und verschiedene Elasticitätsmodeln. Insbesondere wird nach Bauschinger und Uchatius (1877) die Elasticitätsgrenze der Metalle durch Spannung bedeutend erhöht, was Letzterer bei der Anfertigung der Oestr. Stahlbronzekanonen benutzt.

Aufg. 86. Ein Eisenstab von 3^{mm} Durchmesser und 20^{cm} Länge wird durch ein angehängtes Gewicht von $1475{,}146^{kg}$ um 2^{mm} verlängert. Welches ist der Elasticitäts-Modul des Eisens? Aufl.: Man kennt die ausdehnende Kraft für 2^{mm} Verlängerung und einen Querschnitt von $^{9}/_{4}\,\pi$; daraus findet man nach dem Gesetze in 65. die ausdehnende Kraft für 20^{cm} Verlängerung und den Querschnitt von $1^{qmm} = 20\,869^{kg} = m$. — A. 87. Der Elasticitätsmodul des Fischbeins $= 603$; welche Ausdehnung wird ein 8^{mm} breiter, 2^{mm} dicker und 150^{mm} langer Fischbeinstab durch einen angehängten Centner erleiden? Aufl.: Nach (13) ist $\lambda = 0{,}777^{mm}$. — A. 88. Eine Gußstahlstange von 2^{m} Länge soll durch einen Druck von 1000^{kg} nur bis zu $^{1}/_{5}$ der Elasticitätsgrenze beansprucht, d. i. ausgedehnt oder zusammengedrückt werden; welchen Durchmesser muß dieselbe haben? Aufl.: Der Tragmodul $= 55$, der Elasticitätsmodul $= 19549$, daher die Elasticitätsgrenze $= {}^{55}/_{19549}$; die verlangte Formänderung λ soll nur $^{1}/_{5}$ derselben betragen, also nur $^{11}/_{19549}$. Hieraus findet man mit Benutzung von Fl. (13) den Durchmesser $= 10{,}76^{mm}$. — A. 89. Wie verhalten sich die Ausdehnungen zweier Stangen von kreisförmigem und quadratischem Querschnitte, wenn Kreis-Durchmesser und Seite des Quadrates $= 5^{cm}$ sind, und beide Stangen dieselbe Länge und denselben Stoff haben und von derselben Kraft afficirt werden? Wie groß muß die Seite des quadratischen Querschnittes sein, damit hier die Ausdehnung dieselbe sei wie bei der cylindrischen Stange? Aufl.: a. $25 : 19{,}635$; b. Seite $= 4{,}43^{cm}$.

66 **Biegungselasticität.** Bei der Biegung eines Körpers werden die Fasern der concaven Seite zusammengedrückt, die der convexen Seite ausgedehnt, so daß das Grundgesetz der Zug- und Druckelasticität auch hier Anwendung findet. Zwischen den verlängerten und den verkürzten Fasern muß eine Faserschicht liegen, welche ungeändert bleibt und daher neutrale Faser genannt wird. Es gehört zu den beliebtesten Problemen der analytischen Mechanik, die Gestalt der neutralen Faser nach der Biegung, die sogenannte elastische Linie, für die verschiedensten Arten der Belastung und der Unterstützung des Körpers durch Rechnung zu finden. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen den Abscissen und Ordinaten der elastischen Linie aufgesucht, und dieser mathematisch ausgedrückte Zusammenhang wird die Gleichung der elastischen Linie genannt. Diese Gleichung, in welche auch die Dimensionen des gebogenen Körpers, der Elasticitätsmodul und die biegende Kraft eintreten müssen, gibt nicht blos ein Urtheil über die Gestalt der elastischen Linie, sondern auch über den Punkt, wo die Spannung am größten ist, und andere wichtige Größenverhältnisse. So ergibt sich, daß z. B. für einen am einen Ende eingeklemmten, am anderen Ende belasteten rechteckigen Stab die Biegung im geraden Verhältnisse zu der Kraft und zu der dritten Potenz der Länge, aber im umgekehrten Verhältnisse zum Modul, zur Breite und zur dritten Potenz der Höhe steht. Es ist hier nicht der Ort, solche Gesetze abzuleiten; auch die Gesetze über die Tragkraft der Stäbe und Balken können erst aufgestellt werden, wenn die Begriffe des statischen Momentes und des Trägheitsmomentes vorausgesetzt werden können.

67 **Torsions-Elasticität.** Bei der Torsion oder Verwindung findet die einfachste und den meisten Fällen entsprechende Wirkung statt, wenn der Körper an dem einen Ende befestigt und an dem anderen Ende um sich selbst gedreht, gedrillt oder tordirt wird. Es tritt alsdann durch die Verlängerung der einzelnen Fasern in spiralförmige Windungen bekanntlich ein Bestreben des Stabes oder Fadens auf, sich in die ursprüngliche Lage zurück zu drehen. Dieses Bestreben bezeichnet man mit dem Namen Torsionskraft oder oft kurz-

weg Torsion. Es ist sowohl für die Physik wie für die Technik von Wichtigkeit, die Abhängigkeit der Torsionskraft von der Größe des Drehungswinkels und den Dimensionen des Körpers zu kennen. Versuche von Coulomb und Wertheim haben für einen cylindrischen Stab folgenden auch von der Theorie bestätigten Satz ergeben: Die Torsionskraft ist proportional dem Drehungswinkel, der vierten Potenz des Radius und einem Drehungsmodul, der mit dem Elasticitätsmodul in Zusammenhang steht; endlich ist sie der Länge umgekehrt proportional. — Aus diesen wenigen Andeutungen aus der Elasticitätslehre ergibt sich, wie nothwendig der Elasticitätsmodul für die Wissenschaft und die Technik ist, obgleich derselbe keine reale Bedeutung hat. Auch die Schubelasticität ist einem Schubmodul proportional, der in einfachen Verhältnissen zum Elasticitätsmodul steht, nämlich 2/5 desselben beträgt.

In den letzten Jahren sind die Torsionserscheinungen senkrecht aufgehängter, unten beschwerter und sodann tordirter Drähte und Fäden eingehenden Studien unterzogen worden, weil dieselben mit der elastischen Nachwirkung, der inneren Reibung u. s. w. zusammenhängen. Schon Gauß und Weber hatten die Schwingungen untersucht, die ein so gedrillter Draht nach dem Gesetze der Trägheit und durch die Torsion ausführt; sie hatten gefunden, daß die aufeinander folgenden Schwingungsbogen oder Amplituden eine convergirende geometrische Reihe bilden, daß also der Exponent dieser Reihe und sein natürlicher Logarithmus, den man das logarithmische Decrement heißt, constante Größen sind. Die Erscheinung, daß die Amplituden immer kleiner werden, nennt man Dämpfung. Eine ausgedehnte Reihe von Torsionsuntersuchungen hat G. Wiedemann seit 1858 bis heute fortgesetzt und besonders den Zusammenhang von Torsion und Magnetismus untersucht; er unterscheidet dabei temporäre und permanente Torsion, prüft den Einfluß wiederholter Torsionen in derselben, wie auch in entgegengesetzter Richtung, die Wirkung der Größe und Verschiedenheit der Belastung, den Einfluß der Temperatur u. s. w. So fand er z. B. 1879, daß das Decrement bei gewöhnlicher Temperatur wenig von der Belastung abhängt, bei hohen Temperaturen aber mit derselben stark wächst, aber wieder zur alten Größe herabsinkt, wenn die Versuche mit demselben Draht oft wiederholt werden. Etwas Aehnliches hat Wiedemann schon früher und Streintz (1874) gefunden; nach letzterem ist das Decrement unabhängig von der Amplitude und der Schwingungsdauer, von der Belastung und Länge des Drahtes, dagegen für verschiedene Metalle verschieden, und für ein und dasselbe Metall verschieden, je nachdem der Draht ausgeglüht war oder nicht, größer beim nicht geglühten Drahte als beim geglühten, größer bei hoher Temperatur als bei niederer, größer bei noch nicht tordirt gewesenen Drähten als bei oft gedrillten. Die letzte Erscheinung, daß der Widerstand gegen elastische Veränderungen kleiner durch öftere Wiederholungen derselben wird, erklärt das Weichwerden der Stahlfedern durch den Gebrauch, die Zunahme der Güte von Violinen bei langer Benutzung durch gute Spieler, das Verderben einer neuen Trompete durch einen schlechten Bläser u. s. w.; Streintz nennt diese Erscheinung Accommodation. Eine eingehende Untersuchung von P. M. Schmidt (1877) ergab etwas abweichende Resultate; nach diesen gilt das Gauß-Weber'sche Gesetz für jeden Draht nur innerhalb gewisser Amplitudengrenzen; außerhalb derselben nimmt das Decrement mit wachsender Amplitude ab; auch ist es nicht unabhängig von der Länge und die Abhängigkeit ist bei verschiedenen Drähten verschieden. Braun und Kurz haben jedoch (1881) die wesentlichen Resultate von Streintz durch erneute Versuche bestätigt. Die Abweichungen von dem Gauß-Weber'schen Gesetze der Unabhängigkeit des Decrements von der Amplitude habe auch Streintz schon festgestellt; bei zu großen Winkeln würden die bleibenden Deformationen größer, wodurch die Abnahme der Schwingungen verzögert werde; das Gegentheil finde bei zu kleinen Winkeln statt; hier nimmt also das Decrement zu.

68 **Die elastische Nachwirkung.** W. Weber beobachtete schon 1835, daß ein durch Belastung innerhalb der Elasticitätsgrenze ausgedehnter Draht in der Folgezeit bei fortdauernder gleicher Belastung sich noch mehr verlängert, sowie daß umgekehrt ein durch Belastung verlängerter Draht nach Beseitigung der Belastung nicht sofort vollständig seine frühere Gestalt wieder annimmt, sondern daß ein kleiner Theil der Deformation erst nach längerer Zeit nach und nach verschwindet; er nannte diese Erscheinungen, die seitdem für die meisten elastischen Gestaltveränderungen nachgewiesen wurden, elastische Nachwirkung. F. Kohlrausch fand 1866 und bestätigte 1875 durch neue Versuche folgendes Gesetz: Die Geschwindigkeit, mit welcher die elastische Nachwirkung einen Körper der durch neue Kräfte geänderten Gleichgewichtslage annähert, ist proportional dem augenblicklichen Abstande von der schließlichen Gestalt und umgekehrt proportional einer Potenz der Zeit, gerechnet vom Beginn der Wirksamkeit der neuen Kräfte. P. M. Schmidt (1877)

schließt aus seinen Versuchen, daß die Nachwirkungsdeformationen um so größer ausfallen und um so langsamer verschwinden, je geringer die Elasticität des Drahtes ist.

Die elastische Nachwirkung ist an folgendem Experiment deutlich zu sehen: Ein unten geschlossener, senkrecht aufgehängter Gummischlauch ist oben über eine Glasröhre gezogen und mit gefärbter Flüssigkeit so gefüllt, daß dieselbe noch weit in die Glasröhre hineinreicht. Wird nun der Gummischlauch einige Zeit belastet, so fällt die Flüssigkeit, im ersten Augenblicke um eine gewisse Strecke und dann langsam noch ein wenig. Nach Wegnahme der Belastung steigt sie wieder, aber nicht sogleich ganz bis zur alten Höhe; erst nach und nach erreicht sie dieselbe wieder.

Ein auffälliges Beispiel elastischer Nachwirkung machte Tait (1880) bekannt: Erwärmt man Gummi elasticum, dehnt es und windet es dann spiralförmig auf einen Glasstab, kühlt es dann kurze Zeit in einer Kältemischung ab, so zeigt es zunächst nach dem Wiederabwickeln keine Tendenz, sich zusammen zu ziehen, kehrt aber plötzlich zur früheren Länge zurück, sobald es in heißes Wasser gebracht wird. Ueberhaupt sind bei organischen Stoffen die elastischen Nachwirkungen viel stärker als bei unorganischen, und ist außerdem, wie dieses Beispiel zeigt, die Temperatur von großem Einflusse. Bei Elasticitätsuntersuchungen muß die Nachwirkung erst beseitigt sein, weil sonst die Resultate der Untersuchung durch diese beeinflußt sind, worauf es beruhen mag, daß die Angaben über das Decrement so verschieden sind. Wickelt man z. B. einen Draht von einer Rolle ab, hängt ihn senkrecht auf, beschwert und drillt ihn sofort, so erhält man Erscheinungen der Nachwirkung der früheren Aufwickelung und der Torsion. Eine Nachwirkung kann sogar eine neue Einwirkung überdauern. Kohlrausch gab 1875 einem stark tordirten Kautschukfaden 10 Minuten nach dem Aufhören der Einwirkung eine neue entgegengesetzte kleinere Torsion; nach der Rückkehr von dieser zweiten Torsion setzte sich diese Rückkehr langsam als Nachwirkung der zweiten Torsion noch einige Minuten fort, und dann schlug der Faden wieder in die langsame Rückkehr von der ersten Torsion um, setzte die Nachwirkung der ersten Torsion fort, bis er endlich seine ursprüngliche Gestalt wieder erreicht hatte.

Ueber das *Wesen der elastischen Nachwirkung* besteht noch keine Klarheit; solche wird erst dann möglich sein, wenn wir die schwingende Bewegung der Moleküle fester Körper so genau kennen und ebenso mathematisch zu erfassen vermögen, wie die Molekularbewegung der Luftarten, wenn es ebenso eine mechanische oder *kinetische Theorie der festen Körper* gibt, wie wir schon eine kinetische Theorie der Gase haben (s. 54.). Weber hielt schon (1841) die Nachwirkung für wesentlich verschieden von den gewöhnlichen Elasticitätserscheinungen, die letztere sei einer Verschiebung, die erstere einer Drehung der Moleküle zuzuschreiben. Auch Clausius sprach sich (1849) ähnlich aus, ohne indessen dabei von seiner später aufgestellten Hypothese der Molekularbewegung zu sprechen, nach welcher die Moleküle der festen Körper neben den schwingenden Bewegungen auch Achsendrehungen vollziehen (s. 388.). Grade auf diese Bewegungen nun bezieht sich Kohlrausch (1875); wegen der Beharrung der Achsen und Schwingungsebenen (s. 148.) müßten die Moleküle ihrer Drehung einen Widerstand entgegensetzen; ihre Drehung erfolge daher viel langsamer als ihre Verschiebung und die Zurückdrehung müsse ebenso langsam und daher andauernd stattfinden. Daß die Nachwirkung mit der molekularen Bewegung zusammenhänge, sei unzweifelhaft, indem die Temperatur einen so großen Einfluß ausübe und da die großen und complicirten Moleküle der organischen Körper besonders von der Nachwirkung betroffen würden. O. E. Meyer hat (1878) seine Meinung, die Nachwirkung beruhe auf der inneren Reibung der Moleküle, zurückgezogen, besonders auf den Einwurf Kohlrauschs, daß die Wirkung der Reibung nicht so lange dauern könne; er hält aber auch dafür, daß Boltzmann seine (1875) ausgesprochene und mathematisch dargestellte Theorie aufgeben müsse, nach welcher die Nachwirkung nur ein Rest der gewöhnlichen elastischen Verschiebung sei, der sich erst langsam ausgleiche; gegen Boltzmann sprechen allerdings Versuche von Braun (1876), welche unzweifelhaft darthun, daß die Nachwirkung von der gewöhnlichen Elasticität wesentlich verschieden sei; so bringt z. B. eine Verlängerung eines Stabes keine Torsion hervor und verstärkt auch nicht eine schon vorhandene Torsion, wohl aber verstärkt sie eine schon vorhandene Torsionsnachwirkung. Diese Verschiedenheit der elastischen Nachwirkung von der Elasticität ergibt sich auch aus A. Millers Modul-Untersuchungen (1882). Der Modul der elastischen Dehnung und der Modul der elastischen Nachwirkung nehmen beim Eisen zwischen 0 und 100° mit steigender Temperatur ab, aber der letztere viel stärker als der erstere. Im Gegensatze dazu hat Roiti (1878) Nachwirkungserscheinungen an Flüssigkeiten aufgewiesen, die mit Boltzmanns Formeln stimmen. Schließlich scheint Warburg (1878) durch seine mathematische Entwickelung über „das Gleichgewicht eines Systems ausgedehnter Moleküle" einen guten Anfang zu einer kinetischen Theorie der festen Körper und einer kinetischen Erklärung der Nachwirkung gemacht zu haben. Er geht dabei von der in 18. entwickelten Theorie aus, daß die Moleküle fester Körper trans-

latorische Bewegungen um stabile Gleichgewichtslagen, sowie auch rotatorische Bewegungen um Schwerpunktsachsen ausführen. Durch eine Torsion wird nun die letzte Bewegung verstärkt und zwar um einen dem Torsionswinkel proportionalen Betrag, was mathematisch bewiesen wird; hierdurch wird die gesammte lebendige Kraft, die Temperatur erhöht; damit das Wärmegleichgewicht sich wiederherstelle, muß die schwingende Bewegung schwächer werden, die Moleküle müssen sich ihren stabilen Gleichgewichtslagen etwas mehr nähern, was durch das Zusammenstoßen der Moleküle (oder vielleicht durch die Wirkung des Zwischenäthers) geschieht und daher nur langsam stattfinden kann.

Nissen (1880) erklärt die el. Nachw. mittels des Aethers in den molekularen Zwischenräumen des geänderten Körpers (Innenäther) und der Umgebung (Außenäther). Durch eine Ausdehnung eines Drahtes z. B. werden die molekularen Zwischenräume größer, der Innenäther wird verdünnt, also muß Außenäther durch dessen größere Abstoßung eintreten, der so die Dehnungsnachwirkung erzeugt u. s. w. Hesehus (1883) schließt sich dem an, glaubt aber, daß zu einer vollständigen Theorie noch die innere Reibung und die Wechselwirkung der schwingenden Moleküle gehöre.

Die Festigkeit. Die Cohäsion ist die Ursache der Festigkeit. Unter Festigkeit versteht man den Widerstand, den ein Körper der Trennung seiner Theile entgegensetzt. Nach dem Grundgesetze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft“ ist demnach die Festigkeit gleich derjenigen Kraft, welche eine Trennung der Theile zu bewirken im Stande ist. Denn wäre die Festigkeit größer als die äußere Kraft, so würde diese die Theile nicht zu trennen vermögen; wäre jene aber kleiner als diese, so würde schon eine kleinere Kraft die Trennung bewirkt haben; also ist die Festigkeit gleich der äußeren trennenden Kraft. Um die Festigkeit zu finden, hat man daher zahlreiche Versuche angestellt; dieselben ergaben, welche Belastungen nothwendig seien, einen Körper zu zerreißen, zu zerdrücken, zu zerbrechen, zu zerknicken, zu zerwinden oder abzudrehen. Diese Versuchsresultate wurden in Tabellen zusammengestellt. Sodann wurde sowohl durch Versuche, als durch die Theorie nachgeforscht, wie die Festigkeit von der Form und den Dimensionen der Körper abhänge. Wollte man nun einen Körper construiren, der eine bestimmte Last tragen sollte, so rechnete man nach den Ergebnissen dieser Forschungen und nach jenen Tabellen aus, welche Form und Größe er haben müsse, damit er erst bei einer 6—20 mal so großen Belastung breche; man sagte dann, er sei auf 6—20fache Sicherheit gebaut. Es läßt sich auch nicht läugnen, daß es den Behörden, Baumeistern und dem Publikum eine gewisse Beruhigung gewähren müßte, sich sagen zu können: Diese Brücke bricht erst bei einer 20 mal so großen Belastung. Allein man kann dies nicht behaupten, weil, wie im vorigen Kapitel gezeigt wurde, Formänderungen und dadurch Festigkeitsänderungen selbst durch eine geringere, aber dauernde Belastung stattfinden. Es darf daher die Belastung nur einen gewissen Theil des Tragmoduls ausmachen, und der Körper nie bis zu seiner Elasticitätsgrenze verändert werden. Diese bildet daher jetzt die Grundlage der Festigkeitslehre; die älteren Methoden sind weniger wichtig geworden; doch gehören die Elemente derselben immer noch hierher. 69

Man unterscheidet nach der Art der Belastung vier Arten von Festigkeit:

a. Die absolute oder Zugfestigkeit, d. i. der Widerstand, den ein Körper dem Zerreißen entgegensetzt, wenn er z. B. am oberen Ende befestigt und am unteren Ende belastet wird. Sie ist, vorausgesetzt, daß das Gewicht des Stabes unberücksichtigt bleibt, unabhängig von der Gestalt und der Länge des Körpers, dagegen dem Querschnitte desselben direct proportional. 70

Wird also ein Stab z. B. 3 mal so breit und 2 mal so dick, so wird seine Zugfestigkeit 3 . 2 = 6 mal so groß; kennt man die Zugfestigkeit eines Drahtes, so hat ein 5 mal so dicker Draht von demselben Material die 25fache Festigkeit. Man hat daher aus den erwähnten Versuchen die Festigkeit für Körper von 1^{qmm} Querschnitt berechnet und nennt dieselbe den Coëfficienten der absoluten Festigkeit. Der Coëfficient der absoluten Festigkeit ist demnach die Kraft, welche einen Stab von 1^{qmm} Querschnitt eben zerreißt. Wie die Tabelle in 75. zeigt, beträgt derselbe für Eisendraht $= 70^{kg}$; d. h. ein Eisendraht von 1^{qmm} Querschnitt wird durch angehängte 70^{kg} zerrissen. Die Tabelle zeigt auch, daß Guß-

stahl die größte Zugfestigkeit hat. Fast eben so groß scheint indessen diejenige von Coconfäden und Spinnfäden zu sein; denn ein Seil von 1^{qmm} Querschnitt von diesen Fäden würde 50^{kg} tragen können. Seile von organischen Fasern tragen um so weniger, je mehr sie gewunden sind, Seile von Eisendraht aber mehr als Eisenstäbe von gleicher Dicke. Baumwollfasern tragen $100-300^{g}$, Millionen mal ihr eigenes Gewicht. — Je größer die Zugfestigkeit im Verhältnisse zum Tragmodul ist, desto mehr lassen sich die Theilchen des Körpers jenseits der Elasticitätsgrenze verschieben, ohne den Zusammenhang einzubüßen, desto größer ist also die Zähigkeit. — Analog den Versuchen von Bauschinger u. s. w. hat Bottolmey (1880) gefunden, daß die Zugfestigkeit von Metalldrähten durch andauernde Belastung innerhalb der Elasticitätsgrenze bedeutend erhöht wird.

Aufg. 90. Wie groß ist die Festigkeit eines Eisendrahtes von 3^{mm} Durchmesser? Aufl.: $\frac{1}{4} . 3^2 . 3,14 . 70 = 494,55^{kg}$. — A. 91. Wie groß muß der Durchmesser eines Kupferdrahtes sein, der bei 6facher Sicherheit 100^{kg} tragen soll? Aufl.: $\frac{1}{6} . \frac{1}{4} . d^2\pi . 40 = 100$; hieraus $d = 4,37^{mm}$. — A. 92. Wenn ein Eisendraht von 1^{m} Länge und 1^{mm} Dicke im Wasser 6^{g} wiegt, würde sich alsdann ein Telegraphenkabel an einer Meeresstelle von 12000^{m} Tiefe beim Versenken selbst tragen können? Aufl.: 12000^{m} Eisendraht wiegen $12000 . 6 = 72000^{g} = 72^{kg}$. Nun ist aber die absolute Festigkeit des Drahtes 40, höchstens 60^{kg}; also würde das Kabel beim Versenken reißen. Könnte man vielleicht diesen Uebelstand durch dickere Drähte vermeiden? Oder auf andere Art?

71 b. Die **relative** oder **Bruchfestigkeit** ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerbrechen entgegensetzt, wenn er z. B. am einen Ende befestigt und am anderen Ende belastet ist, oder wenn er an beiden Enden unterstützt und in der Mitte belastet ist. Sowohl die Theorie, als auch zahlreiche Versuche haben ergeben, daß die relative Festigkeit eines rechteckigen Balkens **direct proportional der Breite und dem Quadrat der Höhe, aber umgekehrt proportional der Länge ist.** Bei der zweiten Art der Belastung ist die Festigkeit 4 mal so groß als bei der ersten Art, und in beiden Fällen wird die Festigkeit doppelt so groß, wenn die Last auf den ganzen Balken vertheilt ist. Bezeichnet man mit l, b und h die Länge, Breite und Höhe des Balkens und mit f den Coëfficienten der absoluten Festigkeit, sodann mit r den Radius eines cylindrischen Balkens, so ist für die erste Belastungsart die relative Festigkeit des rechteckigen Balkens $Q = f/6 . bh^2 / l$, des cylindrischen $= f/4 . r^3\pi / l$.

Die erste dieser Formeln, deren Richtigkeit wir in der Lehre vom Trägheitsmoment (134.) zeigen werden, und deren die Mechanik eine große Zahl bedarf, enthält das obige Gesetz. Aus demselben folgt, daß die Festigkeit eines Balkens durch eine doppelte Breite nur zweimal, durch eine doppelte Höhe aber viermal so groß wird. Aus diesem Grunde werden die Brückenträger, Wagbalken u. s. w. hoch und schmal gebaut, es wird an allen auf relative Festigkeit beanspruchten Körpern die Hauptmasse in die Höhe, weit weg von der neutralen Faser gebracht; Tragschienen, Maschinentheile erhalten eine Tförmige oder doppelt Tförmige Gestalt; bei den Fischbauchträgern der Mainzer Brücke liegen die hauptsächlich tragenden Massen an den äußeren Rändern; hohle Knochen, hohle Balken tragen mehr als massive von demselben Material und Gewicht; ja Brücken erhalten sogar, wie die berühmte Brittania-Brücke von Stephenson und Fairbairn, eine Röhrenform mit einem Querschnitte von der Gestalt eines Quadrates, dessen oberste Seite die Hauptmasse in Zellen vertheilt enthält, während auf der untersten Seite die Eisenbahnzüge fahren.

Fig. 13.

72 **Aufg.** 93. Wie groß ist die relative Festigkeit einer gewalzten, schmiedeeisernen Schiene, $f = 60$, von 3^{cm} Breite, 15^{cm} Höhe und 6^{m} Länge bei der ersten Belastungsart? Aufl.: $Q = 1125^{kg}$. — A. 94. Wie groß muß der Radius eines hölzernen Balkens sein, wenn derselbe bei 5^{m} Länge und 5facher Sicherheit $282,744^{kg}$ tragen soll, $f = 9$? Aufl.: $Q = \frac{9}{5 . 4} . \frac{r^3 . 3,1416}{5000}$; $r = 100^{mm} = 10^{cm}$. — A. 95. Wie groß muß die Höhe eines Trägers von Gußeisen sein, wenn derselbe 4^{m} lang und 4^{cm} breit ist und mit 10facher Sicher-

heit $73^1/_3$ kg bei der zweiten Belastungsart tragen soll? Aufl.: $Q = \frac{1}{10} \cdot \frac{4f}{6} \cdot \frac{bh^2}{l}$ oder $\frac{2.11}{10.3} \cdot \frac{40h^2}{4000} = \frac{220}{3}$; hieraus $h = 10^{cm}$. — A. 96. Ein gußeiserner Balken von 10^{cm} Höhe und 2^{cm} Breite soll nach der zweiten Art durch sein eigenes Gewicht zerbrechen; wie lang muß er sein? Aufl.: Inhalt des Balkens $2000\,l^{cbmm}$, Gewicht $= 0{,}014\,l^{kg}$. Soll der Balken dieses Gewicht tragen, so muß seine relative Festigkeit nach der zweiten Art, doppelt genommen, jenem Gewichte gleich sein. Also $2 \cdot \frac{4f}{6} \cdot \frac{bh^2}{l} = 0{,}014\,l$, woraus $l = 14475^{mm} = 14{,}475^{m}$. Bei dieser Länge kann sich der Balken noch tragen; bei 15^{m} Länge würde er unter seinem eigenen Gewichte brechen. — A. 97. Aus einem kreisrunden Balken (Fig. 13) soll ein rechteckiger geschnitten werden; in welchem Verhältnisse müssen Höhe und Breite desselben zu einander stehen, damit die Tragkraft desselben den größtmöglichen Werth erhalte? Aufl.: Die relative Festigkeit $f/_6 \cdot bh^2/l$ ist ein Maximum, wenn bh^2 ein Maximum ist, also auch wenn $b(d^2 - b^2) = x$ seinen größten Werth hat. Dies ist der Fall, wenn x abnimmt, sobald b um eine sehr kleine Größe k größer oder kleiner wird, wenn also die 2 Werthe x' und x'', die man durch Substitution von $b + k$ und $b - k$ für b erhält, kleiner als x werden. Diese zwei Werthe sind:

$$x' = (b + k)[d^2 - (b + k)^2] = bd^2 + kd^2 - b^3 - 2kb^2 - k^2b - kb^2 - 2k^2b - k^3$$
$$= bd^2 - b^3 + kd^2 - 3kb^2 - 3k^2b - k^3 \text{ oder}$$
$$x' = b(d^2 - b^2) + k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b + k). \text{ Ebenso}$$
$$x'' = (b - k)[d^2 - (b - k)^2] = bd^2 - kd^2 - b^3 + 2kb^2 - k^2b + kb^2 - 2k^2b + k^3$$
$$= bd^2 - b^3 - kd^2 + 3kb^2 - 3k^2b + k^3 \text{ oder}$$
$$x'' = b(d^2 - b^2) - k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b - k)$$

Subtrahiren wir von jedem dieser 2 ganz analogen Werthe den Werth $b(d^2 - b^2)$ von x, so erhalten wir die 2 Differenzen:

$$x' - x = k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b + k) \text{ und } x'' - x = -k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b - k).$$

Damit nun x ein Maximum sei, müssen diese beiden Differenzen negativ sein; dies ist nur dann durchgehends möglich, wenn der Theil $k(d^2 - 3b^2)$ verschwindet, wenn also $d^2 = 3b^2$ oder wenn $b = d/\sqrt{3}$; für $h = \sqrt{d^2 - b^2}$ ergibt sich dann $h = d\sqrt{2}/\sqrt{3}$. — Diese 2 Werthe zeigen, wie groß Breite und Höhe für den verlangten Zweck sein müssen, und daß deren Verhältniß sein muß $b : h = 1 : \sqrt{2}$. Geometrisch läßt sich dies construiren, wenn man den Durchmesser in 3 gleiche Theile theilt und in einem Theilungspunkte ein Loth errichtet; der Endpunkt desselben ist der Zusammentreffpunkt von b und h.

73 c. Die rückwirkende oder Druck-Festigkeit ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerdrücken entgegensetzt. Zerdrückt wird ein Körper, wenn er mit einer Grundfläche aufliegt und auf die entgegengesetzte Grundfläche eine Belastung wirkt, und wenn die Höhe des Körpers die Breite und Dicke nicht weit überragt. Die rückwirkende Festigkeit ist dann proportional dem Querschnitte. Die Tabelle in 75. gibt die Coëfficienten der rückwirkenden Festigkeit in kg für Körper von 1^{qmm} Querschnitt. Bei Mauersteinen pflegt man nur $^1/_{20}$ der Festigkeit in Anspruch zu nehmen, bei Holz $^1/_{10}$, bei Eisen $^1/_5$. Die Druck- und Zugfestigkeit stimmen in dem Grundgesetze überein, unterscheiden sich aber sehr, wie die Tabelle zeigt, in den Coëfficienten. So ist die absolute Festigkeit des Schmiedeeisens viel größer als die des Gußeisens, die rückwirkende Festigkeit des Schmiedeeisens aber viel kleiner als die des Gußeisens. — Ist die Länge sehr groß im Vergleiche zur Breite und Dicke, ist also der Körper stabförmig, so wird er durch eine aufgelegte Last nicht zerdrückt, sondern seitwärts ausgebogen und zerknickt. Diese Erscheinung ist zusammengesetzte Bruch- und Druckfestigkeit. Ebenso gibt es auch Erscheinungen der zusammengesetzten Biegungs- und Druckelasticität, der zusammengesetzten Biegungs- und Zugelasticität u. s. w. Die Schub- oder Abscheerungsfestigkeit des Schmiedeeisens ist wenig kleiner als die Zug- und Druckfestigkeit desselben, die des Tannenholzes nach der Richtung der Fasern ist 42^{kg} per qcm.

74 d. Die Torsions- oder Drehungsfestigkeit ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerwinden entgegensetzt, wenn er z. B. an beiden Enden von entgegengesetzten Kräften gedreht wird. Dieselbe ist bei einem cylindrischen Körper der dritten Potenz des Radius und bei einem quadratischen Körper der dritten Potenz der Querschnittseite proportional. Bei dem Bau der Radwellen muß die Torsion berücksichtigt werden; der Torsionswinkel darf nach Gerstner nicht $^1/_{10}{}^0$ erreichen.

d. Die Adhäsion.

76 Die Adhäsion ist die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Oberflächentheilchen getrennter Körper an einander haften. Sie muß um so

stahl die größte Zugfestigkeit hat. Fast eben so groß scheint indessen diejenige von Coconfäden und Spinnfäden zu sein; denn ein Seil von 1^{qmm} Querschnitt von diesen Fäden würde 50^{kg} tragen können. Seile von organischen Fasern tragen um so weniger, je mehr sie gewunden sind, Seile von Eisendraht aber mehr als Eisenstäbe von gleicher Dicke. Baumwollfasern tragen $100-300^{g}$, Millionen mal ihr eigenes Gewicht. — Je größer die Zugfestigkeit im Verhältnisse zum Tragmodul ist, desto mehr lassen sich die Theilchen des Körpers jenseits der Elasticitätsgrenze verschieben, ohne den Zusammenhang einzubüßen, desto größer ist also die Zähigkeit. — Analog den Versuchen von Bauschinger u. s. w. hat Bottolmey (1880) gefunden, daß die Zugfestigkeit von Metalldrähten durch andauernde Belastung innerhalb der Elasticitätsgrenze bedeutend erhöht wird.

Aufg. 90. Wie groß ist die Festigkeit eines Eisendrahtes von 3^{mm} Durchmesser? Aufl.: $^1/_4 \,.\, 3^2 \,.\, 3{,}14 \,.\, 70 = 494{,}55^{kg}$. — A. 91. Wie groß muß der Durchmesser eines Kupferdrahtes sein, der bei 6facher Sicherheit 100^{kg} tragen soll? Aufl.: $^1/_6 \,.\, ^1/_4 \,.\, d^2\pi \,.\, 40 = 100$; hieraus $d = 4{,}37^{mm}$. — A. 92. Wenn ein Eisendraht von 1^{m} Länge und 1^{mm} Dicke im Wasser 6^{g} wiegt, würde sich alsdann ein Telegraphenkabel an einer Meeresstelle von $12\,000^{m}$ Tiefe beim Versenken selbst tragen können? Aufl.: $12\,000^{m}$ Eisendraht wiegen $12000 \,.\, 6 = 72\,000^{g} = 72^{kg}$. Nun ist aber die absolute Festigkeit des Drahtes 40, höchstens 60^{kg}; also würde das Kabel beim Versenken reißen. Könnte man vielleicht diesen Uebelstand durch dickere Drähte vermeiden? Oder auf andere Art?

71 b. Die **relative** oder **Bruchfestigkeit** ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerbrechen entgegensetzt, wenn er z. B. am einen Ende befestigt und am anderen Ende belastet ist, oder wenn er an beiden Enden unterstützt und in der Mitte belastet ist. Sowohl die Theorie, als auch zahlreiche Versuche haben ergeben, daß die relative Festigkeit eines rechteckigen Balkens **direct proportional der Breite und dem Quadrat der Höhe, aber umgekehrt proportional der Länge ist.** Bei der zweiten Art der Belastung ist die Festigkeit 4 mal so groß als bei der ersten Art, und in beiden Fällen wird die Festigkeit doppelt so groß, wenn die Last auf den ganzen Balken vertheilt ist. Bezeichnet man mit l, b und h die Länge, Breite und Höhe des Balkens und mit f den Coëfficienten der absoluten Festigkeit, sodann mit r den Radius eines cylindrischen Balkens, so ist für die erste Belastungsart die relative Festigkeit des rechteckigen Balkens $Q = f/_6 \,.\, bh^2 / l$, des cylindrischen $= f/_4 \,.\, r^3\pi / l$.

Die erste dieser Formeln, deren Richtigkeit wir in der Lehre vom Trägheitsmoment (134.) zeigen werden, und deren die Mechanik eine große Zahl bedarf, enthält das obige Gesetz. Aus demselben folgt, daß die Festigkeit eines Balkens durch eine doppelte Breite nur zweimal, durch eine doppelte Höhe aber viermal so groß wird. Aus diesem Grunde werden die Brückenträger, Wagbalken u. s. w. hoch und schmal gebaut, es wird an allen auf relative Festigkeit beanspruchten Körpern die Hauptmasse in die Höhe, weit weg von der neutralen Faser gebracht; Tragschienen, Maschinentheile erhalten eine Tförmige oder doppelt Tförmige Gestalt; bei den Fischbauchträgern der Mainzer Brücke liegen die hauptsächlich tragenden Massen an den äußeren Rändern; hohle Knochen, hohle Balken tragen mehr als massive von demselben Material und Gewicht; ja Brücken erhalten sogar, wie die berühmte Brittania-Brücke von Stephenson und Fairbairn, eine Röhrenform mit einem Querschnitte von der Gestalt eines Quadrates, dessen oberste Seite die Hauptmasse in Zellen vertheilt enthält, während auf der untersten Seite die Eisenbahnzüge fahren.

Fig. 13.

72 **Aufg.** 93. Wie groß ist die relative Festigkeit einer gewalzten, schmiedeeisernen Schiene, $f = 60$, von 3^{cm} Breite, 15^{cm} Höhe und 6^{m} Länge bei der ersten Belastungsart? Aufl.: $Q = 1125^{kg}$. — A. 94. Wie groß muß der Radius eines hölzernen Balkens sein, wenn derselbe bei 5^{m} Länge und 5facher Sicherheit $282{,}744^{kg}$ tragen soll, $f = 9$? Aufl.: $Q = \frac{9}{5 \,.\, 4} \,.\, \frac{r^3 \,.\, 3{,}1416}{5000}$; $r = 100^{mm} = 10^{cm}$. — A. 95. Wie groß muß die Höhe eines Trägers von Gußeisen sein, wenn derselbe 4^{m} lang und 4^{cm} breit ist und mit 10facher Sicher-

heit $73\frac{1}{3}^{kg}$ bei der zweiten Belastungsart tragen soll? Aufl.: $Q = \frac{1}{10} \cdot \frac{4f}{6} \cdot \frac{bh^2}{l}$ oder $\frac{2.11}{10.3} \cdot \frac{40h^2}{4000} = \frac{220}{3}$; hieraus $h = 10^{cm}$. — A. 96. Ein gußeiserner Balken von 10^{cm} Höhe und 2^{cm} Breite soll nach der zweiten Art durch sein eigenes Gewicht zerbrechen; wie lang muß er sein? Aufl.: Inhalt des Balkens $2000\,l^{cbmm}$, Gewicht $= 0{,}014\,l^{kg}$. Soll der Balken dieses Gewicht tragen, so muß seine relative Festigkeit nach der zweiten Art, doppelt genommen, jenem Gewichte gleich sein. Also $2 \cdot \frac{4f}{6} \cdot \frac{bh^2}{l} = 0{,}014\,l$, woraus $l = 14475^{mm} = 14{,}475^{m}$. Bei dieser Länge kann sich der Balken noch tragen; bei 15^{m} Länge würde er unter seinem eigenen Gewichte brechen. — A. 97. Aus einem kreisrunden Balken (Fig. 13) soll ein rechteckiger geschnitten werden; in welchem Verhältnisse müssen Höhe und Breite desselben zu einander stehen, damit die Tragkraft desselben den größtmöglichen Werth erhalte? Aufl.: Die relative Festigkeit $f/_6 \cdot bh^2/l$ ist ein Maximum, wenn bh^2 ein Maximum ist, also auch wenn $b\,(d^2 - b^2) = x$ seinen größten Werth hat. Dies ist der Fall, wenn x abnimmt, sobald b um eine sehr kleine Größe k größer oder kleiner wird, wenn also die 2 Werthe x' und x'', die man durch Substitution von $b + k$ und $b - k$ für b erhält, kleiner als x werden. Diese zwei Werthe sind:

$x' = (b + k)\,[d^2 - (b + k)^2] = bd^2 + kd^2 - b^3 - 2\,kb^2 - k^2b - kb^2 - 2\,k^2b - k^3$
$\quad = bd^2 - b^3 + kd^2 - 3kb^2 - 3k^2b - k^3$ oder
$x' = b\,(d^2 - b^2) + k\,(d^2 - 3b^2) - k^2\,(3b + k)$. Ebenso
$x'' = (b - k)\,[d^2 - (b - k)^2] = bd^2 - kd^2 - b^3 + 2kb^2 - k^2b + kb^2 - 2k^2b + k^3$
$\quad = bd^2 - b^3 - kd^2 + 3kb^2 - 3k^2b + k^3$ oder
$x'' = b\,(d^2 - b^2) - k\,(d^2 - 3b^2) - k^2\,(3b - k)$

Subtrahiren wir von jedem dieser 2 ganz analogen Werthe den Werth $b\,(d^2 - b^2)$ von x, so erhalten wir die 2 Differenzen:

$x' - x = k\,(d^2 - 3b^2) - k^2\,(3b + k)$ und $x'' - x = -k\,(d^2 - 3b^2) - k^2\,(3b - k)$.

Damit nun x ein Maximum sei, müssen diese beiden Differenzen negativ sein; dies ist nur dann durchgehends möglich, wenn der Theil $k\,(d^2 - 3b^2)$ verschwindet, wenn also $d^2 = 3b^2$ oder wenn $b = d/\sqrt{3}$; für $h = \sqrt{d^2 - b^2}$ ergibt sich dann $h = d\sqrt{2}/\sqrt{3}$. — Diese 2 Werthe zeigen, wie groß Breite und Höhe für den verlangten Zweck sein müssen, und daß deren Verhältniß sein muß $b : h = 1 : \sqrt{2}$. Geometrisch läßt sich dies construiren, wenn man den Durchmesser in 3 gleiche Theile theilt und in einem Theilungspunkte ein Loth errichtet; der Endpunkt desselben ist der Zusammentreffpunkt von b und h.

c. Die **rückwirkende oder Druck-Festigkeit** ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerdrücken entgegensetzt. Zerdrückt wird ein Körper, wenn er mit einer Grundfläche aufliegt und auf die entgegengesetzte Grundfläche eine Belastung wirkt, und wenn die Höhe des Körpers die Breite und Dicke nicht weit überragt. Die rückwirkende Festigkeit ist dann proportional dem Querschnitte. Die Tabelle in 75. gibt die Coëfficienten der rückwirkenden Festigkeit in kg für Körper von 1^{qmm} Querschnitt. Bei Mauersteinen pflegt man nur $^1/_{20}$ der Festigkeit in Anspruch zu nehmen, bei Holz $^1/_{10}$, bei Eisen $^1/_5$. Die Druck- und Zugfestigkeit stimmen in dem Grundgesetze überein, unterscheiden sich aber sehr, wie die Tabelle zeigt, in den Coëfficienten. So ist die absolute Festigkeit des Schmiedeeisens viel größer als die des Gußeisens, die rückwirkende Festigkeit des Schmiedeeisens aber viel kleiner als die des Gußeisens. — Ist die Länge sehr groß im Vergleiche zur Breite und Dicke, ist also der Körper stabförmig, so wird er durch eine aufgelegte Last nicht zerdrückt, sondern seitwärts ausgebogen und zerknickt. Diese Erscheinung ist zusammengesetzte Bruch- und Druckfestigkeit. Ebenso gibt es auch Erscheinungen der zusammengesetzten Biegungs- und Druckelasticität, der zusammengesetzten Biegungs- und Zugelasticität u. s. w. Die **Schub- oder Abscheerungsfestigkeit** des Schmiedeeisens ist wenig kleiner als die Zug- und Druckfestigkeit desselben, die des Tannenholzes nach der Richtung der Fasern ist 42^{kg} per qcm. 73

d. Die **Torsions- oder Drehungsfestigkeit** ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerwinden entgegensetzt, wenn er z. B. an beiden Enden von entgegengesetzten Kräften gedreht wird. Dieselbe ist bei einem cylindrischen Körper der dritten Potenz des Radius und bei einem quadratischen Körper der dritten Potenz der Querschnittseite proportional. Bei dem Bau der Radwellen muß die Torsion berücksichtigt werden; der Torsionswinkel darf nach Gerstner nicht $^1/_{10}{}^0$ erreichen. 74

d. Die Adhäsion.

Die Adhäsion ist die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Oberflächentheilchen getrennter Körper an einander haften. Sie muß um so 76

75 Tabelle über Elasticität und Festigkeit, in Kilogrammen für Körper von 1^{qmm} Querschnitt.

Namen der Körper.	Tragmodul. (Elasticitätsgrenze.)	Elasticitäts-Modul.	Coëfficient der absoluten Festigkeit.	Coëfficient der rückwirkenden Festigkeit.	Specif. Gewicht.
Schmiedeeisen . . .	15	20 000	40—70	40—70	7,79
Gußeisen, gegen Zug .	7,5	10 000	11	—	7,21
Gußeisen, gegen Druck	15	10 000	—	70—100	7,21
Stahl	25	20 000	80	—	7,82
Gußstahl	5—65	30 000	100	—	7,91
Messing	5—13	10 000	50	110	8,39
Kupfer	2—12	12 000	30—70	70	8—9
Silber	3—11	7000	16—29	—	10,47
Gold	3—13	6000	10—27	—	19,3
Platin	15—26	17 000	25—35	—	22
Zink	¾— 1	9600	12—15	—	7,2
Blei	1	500	2—5	—	11,35
Zinn	½	3000	3—5	—	7,29
Antimon	—	—	¾	—	6,71
Wismuth	—	—	1	—	9,82
Marmor	1	2000	5	8—10	2,84
Kalkstein	—	650	4	1—14	2,65
Sandstein	—	—	7	0,2—2	2,45
Quarz	—	360	12	20	2,65
Basalt	—	—	9	12	2,55
Granit	—	—	8	10—17	2,75
Glas	—	90	1—3	—	2,6
Holz	2	1100	1—8	3—8	0,6—0,8
Fischbein	5	700	—	—	
Kautschuk	0,5	0,1	—	—	
Luft	mehr als 1	0,02			0,001293
Quecksilber					13,59

Anm. Die Unterschiede im Tragmodul sind so zu verstehen, daß die größere Zahl für das ausgezogene, die kleinere für das geglühte Metall gilt.

größer sein, je größer die Zahl der sich berührenden Theilchen ist, je größer also die sich berührenden Flächen sind, und dann je weniger Zwischenräume zwischen den beiden Fällen bleiben, je glatter also dieselben sind.

Schleift man zwei Platten von Glas, Marmor, Messing oder anderem Metall sehr eben und schiebt sie über einander, nachdem man durch leichtes Anhauchen auch noch die letzten Unebenheiten erfüllt hat, so fällt es oft schwer, sie wieder von einander zu trennen. Man darf daher Spiegeltafeln nie unmittelbar auf einander legen. Doch ist die Adhäsion beim blosen Aufeinanderlegen nicht so groß wie die Cohäsion, weil die Oberflächen niemals vollkommen eben sind, und eine dünne Luftschicht an jeder etwas älteren Oberfläche haftet. Schabt man aber zwei Bleistücke vollkommen eben und preßt sie sofort zusammen, so haften sie so fest, wie wenn sie ursprünglich ein Stück gebildet hätten; denn hier hat man wegen der Weichheit des Bleies die Theilchen so zwischen einander gepreßt, daß die Adhäsion zur Cohäsion geworden ist. Spring hat (1878) Pulver von Salpeter, Sägespäne von Pappelholz, Staub von einem Schleifsteine und gestoßene Kreide durch einen Druck von 40000^{at} in stein- und holzartige Massen verwandelt von größerer Dichte und Festigkeit, als die festen Massen ursprünglich besaßen; hierbei werden die Stoffe nicht krystallinisch, wie Jeannetaz (1883) gezeigt hat; aber auch hier ist die Adhäsion zu Cohäsion geworden. Dies ist sonst nur dann möglich, wenn man die Zwischenräume zweier frischen und darum luftschichtfreien Oberflächen ganz ausfüllt. Darauf beruhen viele gewöhnlichen Methoden, Körper in ein Ganzes zu verbinden. Beim Leimen z. B. füllt man die Poren und Vertiefungen zweier frischen Holzflächen mit dem flüssigen Leime, so daß kein leerer Zwischenraum bleibt und nach dem Trocknen Holz und Leim nur eine einzige feste Masse bilden. Zu solchen Operationen, wie Kitten, Leimen, Kleben, Löthen, Mauren u. s. w. ist daher immer nur eine flüssige oder wenigstens weiche, aber festwerdende Masse tauglich, welche zu den betreffenden Körpern Ad-

häsion hat. In solchen Fällen kann die Adhäsion des vielfach eingreifenden Bindemittels oft so groß sein, daß, wie bei altem Mauerwerk, wo auch noch ein chemisches Festwerden eintritt, die verbundenen Körper eher an anderen, vielleicht schwachen Stellen brechen als an den Bindestellen. Auch das Anhaften von Staub an Wänden, das Schreiben und Zeichnen mit Kreide, Bleistift und Griffeln, die Pastellmalerei u. s. w. beruhen auf der Adhäsion fester Körper. Doch sind diese Schriften leicht verwischbar, weil sie nur auf den obersten Oberflächentheilchen haften. Beim Schreiben mit Tinte, beim Malen mit flüssigen Farben u. s. w. bringt die Flüssigkeit nicht blos in die Vertiefungen, sondern auch in die Poren ein, nimmt die färbenden Theilchen mit und läßt dieselben beim Verdunsten dort zurück; daher haften solche Schriften und Zeichen fester. In ähnlicher Weise erklärt sich auch das Anhaften galvanischer Niederschläge beim galvanischen Vergolden und Versilbern, die Feuervergoldung und die Vergoldung auf nassem Wege. Aber auch das trockne Vergolden und alle anderen Metallüberzüge sind Wirkungen der Adhäsion, wie z. B. das Anhaften der Zinnquecksilberfolie an den gewöhnlichen Spiegeln.

Auch die Flüssigkeiten haben Adhäsion zu einander; bringt man getrennte Theile einer Flüssigkeit zusammen, so verdrängen sie die Zwischenluft und vereinigen sich in eine Masse; hier wird also die Adhäsion sogleich wieder zur Cohäsion; die Cohäsion der Flüssigkeiten stimmt daher nicht ganz mit der der festen Körper, und darum mag es gerechtfertigt sein, den von Frankenheim (1835) für sie gewählten Namen Synaphie (συν mit, ἡ ἁφή das Berühren) anzunehmen, und die Adhäsion der Flüssigkeiten gegen feste Körper mit Prosaphie zu bezeichnen. Die Prosaphie der Flüssigkeiten mißt man, indem man an das eine Ende eines Wagbalkens eine reine und ebene Platte des festen Körpers genau wagrecht hängt, das Gleichgewicht herstellt und sodann unter die Platte die Flüssigkeit in einem weiten Gefäße bis zur Berührung bringt. Endlich legt man auf die Wagschale Gewichte bis zum Abreißen; dieses Gewicht gibt die Größe der Prosaphie an. So findet man, daß selbst Quecksilber zu Glas Prosaphie besitzt; die Thatsache, daß an einem in Quecksilber eingetauchten Glasstabe kein Tropfen bleibt, ist kein Gegenbeweis; er zeigt nur, daß die Prosaphie kleiner ist als das Gewicht der Quecksilbertröpfchen. Durch die Wägeversuche erfährt man, daß die Prosaphie der Flüssigkeiten selbst gegen einen und denselben Körper höchst verschieden ist; deßhalb verdrängen sich kleine Flüssigkeitsmassen auf einer Glasplatte. Indessen erhält man bei den Wägeversuchen nur dann die Prosaphie, wenn an der Platte keine flüssige Schicht hängen bleibt, wenn die Platte nicht benetzt wird; von der Synaphie aber läßt sich dann behaupten, daß sie größer ist als die Prosaphie. Bleibt dagegen eine flüssige Schicht an der Platte hängen, so hat man nicht die Prosaphie, sondern die Synaphie gemessen, und von der Prosaphie läßt sich dann behaupten, daß sie größer als die Synaphie ist. Da sich für jede Flüssigkeit eine Platte finden läßt, welche von ersterer benetzt wird, z. B. für Wasser eine Glasplatte, für Quecksilber eine Zinkplatte, so kann man für jede Flüssigkeit die Synaphie auffinden. Von allen Flüssigkeiten hat nach Frankenheim das Wasser die größte Synaphie; sie beträgt 537 Milliontel Atmosphäre, während für das Quecksilber nach Fiebig (1861) nur die Zahl 425 gilt. Die kleinste Synaphie haben nach Scholz (1873) die zusammengesetzten Aetherarten und unter diesen der Schwefeläther, welchem etwa die Zahl 180 entspricht. Von großem Einflusse auf Synaphie und Prosaphie ist die Temperatur; beide nehmen bei wachsender Temperatur ab. — Je nachdem die Synaphie größer oder kleiner als die Prosaphie ist, finden beim Zusammenwirken von festen und flüssigen Körpern entgegengesetzte Erscheinungen statt, die wir in dem Kapitel von der Capillarität näher betrachten werden.

Daß Flüssigkeiten an einander adhäriren, sieht man schon an dem Zerfließen eines Wassertropfens auf Quecksilber, eines Oeltropfens auf Wasser; auch hier ist die Adhäsion wieder sehr verschieden und verdrängen sich daher kleine Partieen von Flüssigkeiten unter den seltsamsten Bewegungen. Wenn größere Massen starke Adhäsion zu einander haben, so durchdringen sie sich gegenseitig, die eine löst sich in der anderen. (Siehe die Diffusion der Flüssigkeiten und die Endosmose). Ist ihre Adhäsion klein, kleiner als ihre Cohäsion, so mischen sie sich nicht, sondern ordnen sich nach ihrem specifischen Gewichte über einander. Ist dieses bei zwei Flüssigkeiten gleich groß, so bildet die kleinere Masse in der größeren eine Kugelgestalt, was wir in der Lehre von der Gestalt der Flüssigkeiten näher betrachten werden (Plateaus Versuch.)

Luftförmige Körper adhäriren ebenfalls, doch nicht an einander, weil die Gastheilchen einander wegen ihrer heftigen fortschreitenden Bewegung abstoßen, aber an feste und flüssige Körper; daher bilden sie, besonders auf glatten und festen Körpern eine dichte, oft schwer zu beseitigende Schicht (siehe die Luftbilder), daher dringen sie in das Innere der festen und flüssigen Körper hinein, wobei sie von der raschen Bewegung ihrer Moleküle unterstützt werden; sie werden also von festen und flüssigen Körpern verschluckt oder absorbirt, manche in unglaublicher Menge, andere fast gar nicht. Holz in Wasser geworfen bedeckt sich mit Luftblasen; erwärmtes Wasser singt, weil unzählige Lufterschütterungen durch aufsteigende Bläschen entstehen.

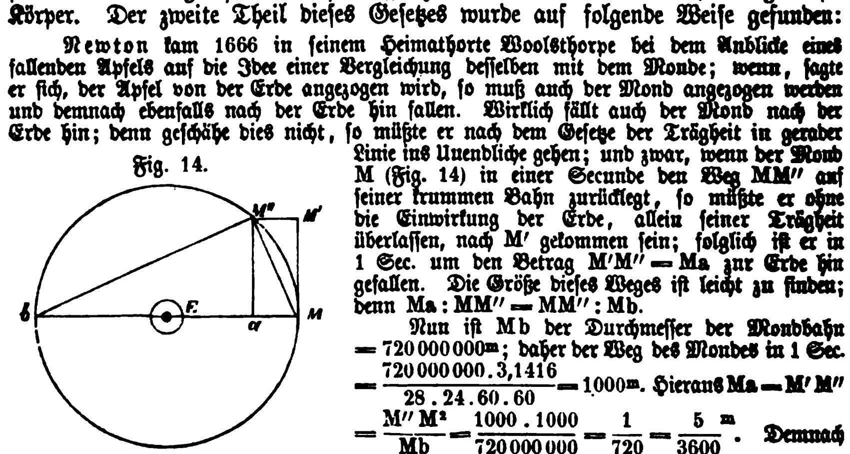
e. Die Schwere oder Schwerkraft.

77 Die Schwere ist die Kraft, mit welcher die Erde alle zu derselben gehörigen Körper anzieht. Diese Kraft hat ihren Sitz nicht in irgend einem bestimmten Punkte, sondern in jedem Atom der ganzen Erde. Ein Körper kann aber diesen unendlich vielen Anziehungen nicht folgen, er kann sich nicht gleichzeitig nach unendlich vielen Richtungen hin bewegen, sondern nur nach einer; diese Richtung muß eine solche Lage haben, daß der Körper nach keiner Seite hin eine größere Anziehung erfährt als nach den übrigen Seiten; und dieses ist nur dann der Fall, wenn die Richtung, welche der Körper einschlägt, von allen nur denkbaren Richtungen die mittlere ist, d. h. wenn der Körper sich nach dem Mittelpunkte der Erde hin bewegt. Die Wirkung der Schwerkraft besteht demnach darin, daß ein nicht unterstützter Körper sich nach dem Mittelpunkte der Erde hin bewegt, daß er nach dem Mittelpunkte der Erde hin fällt. Diese Richtung des Sinkens oder eines durch das Bleiloth beschwerten Fadens nennt man die senkrechte oder lothrechte (verticale) Richtung oder kurz das Loth; diejenige, welche mit dieser einen rechten Winkel bildet, heißt die wagrechte oder horizontale Richtung. Die senkrechte Richtung auf einem Pole macht mit derjenigen auf dem Aequator einen rechten Winkel, die senkrechten Richtungen der nicht weit von einander entfernten Orte schließen aber einen so kleinen Winkel ein, daß man denselben nicht durch Winkelmeßinstrumente messen kann, und daß man also jene beiden Richtungen als parallel ansehen darf.

Die Schwerkraft der Erde wirkt nach dem Gravitationsgesetze, steht also im geraden Verhältnisse zu den Massen des anziehenden und des angezogenen Körpers und im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung dieser Körper. Der zweite Theil dieses Gesetzes wurde auf folgende Weise gefunden:

Newton kam 1666 in seinem Heimathorte Woolsthorpe bei dem Anblicke eines fallenden Apfels auf die Idee einer Vergleichung desselben mit dem Monde; wenn, sagte er sich, der Apfel von der Erde angezogen wird, so muß auch der Mond angezogen werden und demnach ebenfalls nach der Erde hin fallen. Wirklich fällt auch der Mond nach der Erde hin; denn geschähe dies nicht, so müßte er nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen; und zwar, wenn der Mond M (Fig. 14) in einer Secunde den Weg MM'' auf seiner krummen Bahn zurücklegt, so müßte er ohne die Einwirkung der Erde, allein seiner Trägheit überlassen, nach M' gekommen sein; folglich ist er in 1 Sec. um den Betrag M'M'' = Ma zur Erde hin gefallen. Die Größe dieses Weges ist leicht zu finden; denn Ma : MM'' = MM'' : Mb.

Fig. 14.



Nun ist Mb der Durchmesser der Mondbahn = 720 000 000^m; daher der Weg des Mondes in 1 Sec. $= \frac{720\,000\,000 . 3,1416}{28 . 24 . 60 . 60} = 1000^m$. Hieraus Ma = M'M'' $= \frac{M''M^2}{Mb} = \frac{1000 . 1000}{720\,000\,000} = \frac{1}{720} = \frac{5}{3600}{}^m$. Demnach fällt der Mond in jeder Secunde um $^5/_{3600}{}^m$ nach der Erde hin; wenn auf der Erdoberfläche ein Körper zu fallen beginnt, so durchfällt er in der ersten Secunde 5^m; folglich ist die Anziehung der Erde auf den Mond 3600 = 60^2 mal kleiner als auf die Erdkörper. Nun ist aber der Mond 60 mal weiter von dem Erdmittelpunkte entfernt als diese Körper; folglich steht die Anziehung im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entfernung. Dieses wichtige Resultat über das Gesetz der Schwere erhielt Newton nicht bei der ersten Rechnung, weil er den Halbmesser der Erde, den vorausgegangenen unvollkommenen Messungen gemäß viel zu klein angenommen hatte. Erst als nach Picards Gradmessung im Jahre 1682 eine richtigere Größe für den Halbmesser bekannt wurde, wiederholte er die Rechnung und fand so sein Gesetz bewiesen. Das Werk „Principia philosophiae naturalis mathematica, 1688“, das Grundbuch der neueren Astronomie, enthält diese Ableitung des Gesetzes.

78 Die Größe der Intensität der Erdschwere wird gemessen durch die Haupt-

wirkung derselben, nämlich durch die Geschwindigkeit, die sie einem frei fallenden Körper in jeder Secunde ertheilt; dieselbe ist an der Erdoberfläche = 9,808^m, in runder Zahl = 10^m und wird als Maß der Gravitation der Erde ganz allgemein mit g bezeichnet. Aus dem Gravitationsgesetze ergeben sich folgende Sätze:

1. Im Mittelpunkte der Erde kann man sich die ganze Schwerkraft vereinigt denken. Denn alle Körper fallen nach dem Mittelpunkt der Erde zu; die Atome wirken also zusammen gerade so, als ob sie in dem Mittelpunkte vereinigt wären. Es wird daher häufig der Mittelpunkt der Erde als Sitz der Schwere bezeichnet.

2. Alle Körper sind an demselben Orte gleich schwer, d. h. sie fallen im luftleeren Raume in gleicher Zeit durch gleiche Höhe. Zwar wird nach dem Gesetze eine größere Masse stärker angezogen als eine kleinere; 1000 Atome eines Körpers erfahren eine 1000 mal so große Anziehung als ein Atom desselben Körpers. Eine 1000 mal so große Masse erhält aber durch die 1000fache Kraft nur genau dieselbe Bewegung, wie eine einfache Masse durch die einfache Kraft. Daraus folgt, daß große und kleine, schwere und leichte Körper, Körper von dem verschiedensten Stoffe, abgesehen von der Gegenwirkung der Luft, in ganz gleicher Weise zur Erde niederfallen müssen. Diese Uebereinstimmung wurde durch genaue Versuche von Newton und Bessel (besonders Pendelversuche) nachgewiesen; durch Fallversuche in luftleeren Röhren oder durch ein Papierschnitzel auf einem großen, fallenden Geldstücke kann man dieselbe leicht bewährt finden.

3. Auf hohen Bergen ist die Schwere geringer als in der Ebene oder im Thale, weil erstere Orte weiter vom Mittelpunkte der Erde entfernt sind als die letzteren.

4. Die Schwere nimmt vom Aequator nach den Polen hin zu, und zwar ist sie an den Polen um $1/200$ größer als an dem Aequator. Die Ursache dieser Zunahme sind: a. Die Pole sind dem Mittelpunkte der Erde um 3 Meilen näher als der Aequator. b. Die Centrifugalkraft der Erdkörper, welche der Schwere derselben entgegenwirkt, ist auf den Polen = 0, wächst nach dem Aequator zu und erreicht auf demselben den höchsten Grad, weil die Geschwindigkeit der Körper in ihrer Bahn um die Erdachse in der angeführten Weise wächst. c. Die Centrifugalkraft wirkt auf dem Aequator der Schwere direct entgegen, vermindert also dieselbe um ihren vollen Betrag; nach den Polen zu wirkt dagegen nur ein immer kleinerer Betrag der Centrifugalkraft der Schwerkraft entgegen, weil dann die Schwungkraft mit der Schwerkraft einen stumpfen Winkel macht, indem die Richtung der ersteren in der Ebene des Parallelkreises liegt, die Richtung der letzteren aber nach dem Mittelpunkte der Erde geht.

5. Die Schwere nimmt ab von der Oberfläche nach dem Mittelpunkte zu; denn eine genauere Betrachtung ergibt, daß in einer Erde von gleichmäßiger Dichte die Schwere im directen Verhältnisse zur ersten Potenz der Entfernung vom Mittelpunkte steht, daß also ein Massenpunkt, der in 2, 3, 4 ... facher Entfernung vom Mittelpunkte sich befindet, eine 2, 3, 4 ... fache Anziehung erfährt.

Es ist dies kein Widerspruch zu, sondern eine Folgerung aus dem Gravitationsgesetze. Es läßt sich nämlich mathematisch beweisen, was uns indeß hier zu weit führen würde, daß die anziehende Wirkung einer gleichmäßig dichten Kugelschale auf einen Punkt im Hohlraume derselben gleich Null ist; man kann sich diesen Satz einigermaßen erklären, wenn man die von allen Seiten durch die Schale auf den Punkt ausgeübten Anziehungen ins Auge faßt, die sich einander aufheben. Wenn wir demnach die Schwere eines inneren Punktes der Erde beurtheilen wollen, so können wir nach diesem Satze die Schale außerhalb dieses Punktes ganz außer Betracht lassen; der Punkt wird nur von der Restkugel, deren Radius x gleich der Entfernung des Punktes vom Mittelpunkte ist, angezogen. Ist nun die Masse der ganzen Erde = m und die Dichte gleichförmig, so ist die Masse der den Punkt anziehenden Kugel $= mx^3/r^3$; die Anziehung derselben auf den Punkt von der Masse 1 ist nach dem Gravitationsgesetze $k = C(mx^3/r^3)/x^2 = Cmx/r^3$. Bezeichnen wir die durchschnittliche Dichte der Erde mit δ, so ist $m = 4/3\, r^3 \pi \delta$; daher $k = 4/3\, C\pi . \delta x$ d. i. die Anziehung ist

direct proportional der Entfernung vom Mittelpunkte. Hieraus würde sich einfach ergeben, daß die Schwere in einem tiefen Schachte kleiner als an der Oberfläche sein müßte; als jedoch Airy (1866) seine berühmten Versuche in einem Kohlenwerke anstellte, ging eine Uhr in 383^m Tiefe nicht nach, wie jene Folgerung gebietet, sondern täglich $2^1/_4$ Sec. vor, woraus er für diesen Punkt nicht eine Abnahme, sondern eine Zunahme der Schwere von $^1/_{19190}$ berechnete. Die Zunahme ist nach unserer Formel wohl möglich, wenn δ nicht constant ist, und zwar wenn δ bis zu dem betreffenden Punkte in stärkerem Verhältnisse zugenommen, als x abgenommen hat. Das spec. G. der Erdkugel, welches an der Oberfläche 2—3 beträgt, nimmt nach dieser Folgerung gegen den Mittelpunkt hin zu; dies stimmt mit anderen Versuchen, nach welchen das durchschnittliche spec. Gew. der Erde 5—6 beträgt.

6. Im Mittelpunkte der Erde hat ein Körper gar keine Schwere, d. i. kein Fallbestreben mehr, könnte also dort frei schweben; denn dort ist die Anziehung von allen Seiten gleich stark; es wird also jede Anziehung durch eine ganz gleiche, aber entgegengesetzte aufgehoben; auch folgt es leicht aus der Formel für k.

7. Die Schwerkraft ist gegenseitig, d. h. die Erde wird von jedem Körper eben so stark angezogen, als sie denselben anzieht; denn jedes Theilchen des Körpers wirkt auf jedes Theilchen der Erde eben so stark anziehend, als jedes Erdtheilchen jedes Körperatom anzieht. Wegen dieser Gegenseitigkeit der Anziehung fällt die Erde ebensowohl nach einem Steine hin, als der Stein gegen die Erde fällt; nur ist die Bewegung der Erde so viel mal kleiner wie die des Steines, als ihre Masse die des Steines übertrifft, weil sich nämlich die Anziehung des Steines auf die ganze, ihn unendlich übertreffende Erdmasse vertheilen muß; die Bewegung der Erde ist also so gut wie Null.

79 **Das Gewicht.** Ein Körper fällt nur, wenn er nicht unterstützt ist. Ist er aber unterstützt, so muß sein Streben zu fallen doch noch vorhanden und dadurch merkbar sein, daß er seine Unterlage mit einer gewissen Kraft nach dem Mittelpunkte der Erde hinzuschieben strebt, eine Kraft, welche man Gewicht nennt. **Das Gewicht ist also der Druck, den ein Körper auf seine Unterlage ausübt, weil er von der Erde angezogen wird.** Die Richtung dieses Druckes geht nach dem Mittelpunkte der Erde. Das Gewicht eines Körpers ist um so größer, je größer seine Masse ist, weil die Anziehung mit der Masse wächst; es kann daher das Gewicht zur Vergleichung der Massen dienen, sowie auch als Maß der Anziehung, die ein irdischer Körper von der Erde erleidet.

Man unterscheidet das **absolute Gewicht** und das **specifische Gewicht**. Das absolute Gewicht gibt an, wie viel ein Körper **Gewichtseinheiten** eines Landes enthält. Die Gewichtseinheit der Wissenschaft ist das Gramm, dessen Einführung mit der des Metermaßes immer weiter schreitet. Ein Gramm ist das Gewicht eines Cubikcentimeters destillirten Wassers bei 4^0 C; man bezeichnet ein Gramm mit 1^g.

Eintheilung des Grammgewichtes.

10^g = 1 Dekagramm	1000^{kg} = 1 Tonne = 1^t.
100^g = 1 Hektogramm	$0,1^g$ = 1 decigramm
1000^g = 1 Kilogramm = 1^{kg}	$0,01^g$ = 1 centigramm
10000^g = 1 Myriagramm	$0,001^g$ = 1 milligramm = 1^{mg}.

Das deutsche Pfund, auch Zollpfund (vom Zollverein) genannt = $^1/_2{}^{kg}$ = 500^g.

Vergleichung der wichtigsten Gewichte.

1 deutsches ℔. = 500^g.
1 köln. Mark = $233,855^g$ (bei Gold und Silber gebräuchlich).
1 altes preuß. ℔. = 468^g.
1 engl. ℔. = 454^g.
1 Wiener ℔. = 560^g.
1 Ruff. ℔. = 410^g.

Die Definition des specifischen Gewichtes s. 19, die Bestimmung desselben 164.

Aufg. 98. Wie groß ist der Fall der Erde per Secunde gegen die Sonne, wenn die Entf. derselben von der Erde = 20 Mill. M. beträgt? Aufl.: Nach der Methode in 77.

ergibt sich $^1/_{337}$ m. — A. 99. Hieraus die Sonnenmasse zu berechnen? Aufl.: Ist die Entf. der Sonne die 386fache des Mondes und der Fall des Mondes gegen die Erde genauer $^1/_{735}$, so verhält sich die Sonnenmasse zur Erdmasse wie $386^2 . {}^1/_{337} : {}^1/_{735}$, ist also ca. 325000 Erdmassen. — A. 100. Die Masse der Sonne ist gleich 325000 Erdmassen; der Halbmesser der Sonne ist 94000 geogr. Meilen; welche Geschw. erhält ein fallender Sonnenkörper in jeder Secunde? Aufl.: Die Anziehung der Sonne auf einen Körper der Sonnenoberfläche verhält sich zur Anziehung der Erde auf einen Körper der Erdoberfläche wie $325000 . 860^2 : 1 . 94000^2$, oder wie 27 : 1; folglich ist die Acceleration der Sonne = 27 . 10 = 270 m. Ebenso ist auf der Sonne das Gewicht einer Masse das 27fache des Gewichtes derselben Masse auf der Erde; ein Erdkörper von 1kg würde auf der Sonne 27, auf dem Monde nur $^1/_6$kg wiegen. Um also einen Körper zu heben, würde auf der Sonne die 27fache Kraft von derjenigen nöthig sein, die auf der Erde ausreichen würde; um aber einen Körper wagrecht fortzubewegen, bedürfte es, abgesehen von den Widerständen, keiner größeren Kraft als auf der Erde, weil die lebendige Kraft $^1/_2 mv^2$ von der Masse abhängt, diese aber unter allen Umständen unverändert bleibt. — A. 101. Wie groß ist die Acceleration des Jupitermondes, der 60000 M. vom Jupiter entfernt ist und sich in 42 Stunden um denselben dreht, gegen den Jupiter, und die des Jupiter gegen die Sonne, wenn die Entf. derselben vom Jupiter 108 Mill. M. beträgt? Aufl.: 0,38m und 0,000113m. — A. 102. Hieraus die Masse des Jupiter zu finden? Sonnenmasse zu Jupiter = $0{,}000113 . 1800^2 / 0{,}38$ = 1000 : 1. ca. — A. 103. Wie groß ist die Schwerkraft auf dem Monde, wenn dessen Dm. 468 M. und seine Masse $^1/_{80}$ der Erdmasse ist? Aufl.: $(g / 80) (1720 / 468)^2 = {}^1/_6 g$. — A. 104. Was wiegt ein Körper, der am Aeq. 200kg wiegt, am Pole, und was in unserer Gegend, wo die Zunahme der Schwere ca. $^1/_{300}$ beträgt? Aufl: 201, $200^2/_3$kg. — A. 105. Ist dies mittels Gewichtswagen nachweisbar, oder mit Federwagen?

f. Die Gravitation oder Weltanziehung.

Die Gravitation ist die Anziehung der Weltkörper gegen einander. Schon 80 Keppler hat es in seinem berühmten Werke über den Mars (astronomia nova αἰτιολόγητος, tradita commentariis de motu stellae martis, 1609) ausgesprochen, daß die Weltkörper ein Bestreben haben, sich einander zu nähern, daß dieses Bestreben die Ursache ihrer krummlinigen Bewegung um einander, die Ursache von Ebbe und Fluth u. s. w. sei. Ja, er sprach es auch schon aus, daß dies Bestreben im geraden Verhältnisse mit der Masse und im umgekehrten Verhältnisse mit dem Quadrat der Entfernung stehe. Er hatte also das Gesetz der Gravitation schon erkannt, aber weder nachgewiesen, noch angewendet. Erst Newton gelang beides. Dieser zeigte zunächst, daß das Gravitationsgesetz für die Anziehung der Sonne gegen die Planeten gelte. Wäre nämlich die Anziehung der Sonne gegen die Planeten die einzige auf die Planeten wirkende Kraft, so müßten die Planeten in die Sonne stürzen; die Planeten haben aber, unbekannt woher, eine gewisse fortschreitende Bewegung, eine gewisse lebendige Kraft in sich; wäre diese allein vorhanden, so müßten die Planeten in gerader Linie ins Unendliche gehen. Durch das Zusammenwirken dieser beiden Kräfte, der Anziehung der Sonne und der lebendigen Kraft der Planeten, entsteht die Bahn derselben um die Sonne. In dieser Bahn kann ein Planet nur bleiben, wenn die Anziehung oder Gravitation der Sonne gleich ist der aus der lebendigen Kraft des Planeten hervorgehenden Centrifugalkraft derselben. Was daher für die Centrifugalkräfte zweier Planeten gilt, muß auch für die Gravitation derselben gegen die Sonne gelten. Da nun, wie Newton aus Kepplers Gesetzen fand, die Schwungkräfte der Planeten in umgekehrtem Verhältnisse zu den Quadraten ihrer Abstände von der Sonne stehen, so müssen auch die Gravitationen der Sonne gegen die Planeten in diesem Verhältnisse stehen. — Newton zeigte sodann nach 77., daß die Gravitation mit der Schwerkraft identisch sei, indem er die Geltung des Gravitationsgesetzes auch für diese nachwies. — Nach den Lehren der analytischen Mechanik kann bei der Geltung des Gravitationsgesetzes die Bahn eines Weltkörpers nur eine Ellipse, Parabel oder Hyperbel sein; umgekehrt, wenn sich

Weltkörper in eben solchen Linien um andere Weltkörper bewegen, die in den Brennpunkten jener Linien stehen, so muß zwischen den Weltkörpern das Gravitationsgesetz gelten. Daher gilt dieses Gesetz auch für die Kometen, ja sogar für die Sonnen oder Fixsterne, da man wenigstens bei den Doppel- und mehrfachen Sternen elliptische Bahnen wahrgenommen hat. Das Gravitationsgesetz ist demnach ein Weltgrundgesetz, die Gravitation eine Weltkraft.

Die Gravitation erklärt: 1. Die Bewegung eines Weltkörpers um einen anderen (s. 142.). 2. Die Störungen oder Ablenkungen (Perturbationen) eines Weltkörpers aus seiner gesetzmäßigen Bahn (s. 566.). 3. Die Erscheinungen der Ebbe und Fluth (s. 586.). 4. Die Entdeckung des Planeten Neptun und die Vermuthung von intramercuriellen Planeten (s. 567. und 574.).

Die Gravitation ist wie die Schwerkraft gegenseitig; die Sonne zieht nicht blos die Erde an, sondern wird auch von der Erde mit ganz gleicher Kraft angezogen. Die Anziehung der Sonne wird aber auf die verhältnißmäßig kleine Erdmasse ausgeübt, die Anziehung der Erde aber vertheilt sich auf die ganze, ungeheuere Sonnenmasse. Wenn sich nun auch wegen der gegenseitigen Anziehung die Erde nicht eigentlich um die Sonne, sondern beide um den Mittelpunkt dieser zwei Massen bewegen, so ist doch diese Bewegung der Sonne unmerklich und die der Erde außerordentlich groß, weil der Mittelpunkt der zwei Massen, der sogenannte Schwerpunkt, in die Sonne fällt.

81 **Das Räthsel der Schwerkraft** (Huyghens 1690, Isenkrahe 1879). Newton, der Entdecker des Gravitationsgesetzes, dachte sich die Gravitation oder Schwerkraft durchaus nicht als eine unvermittelte Wirkungsfähigkeit in die Ferne, sondern überließ es der Erwägung seiner Leser, sich eine Vorstellung davon zu bilden oder nicht. Schon Huyghens indessen versuchte die Schwerkraft zu erklären durch die Annahme, der Weltraum sei mit einem materiellen Fluidum erfüllt, dessen äußerst feine Theilchen in unaufhörlicher Bewegung mit reißendster Geschw. nach allen Richtungen begriffen seien. An diese Vorstellung von Huyghens knüpfte Isenkrahe, nachdem er eine größere Zahl der seitdem aufgestellten Theorien der Schwerkraft als ungenügend nachgewiesen hatte, seinen Versuch, das Räthsel der Schwerkraft zu lösen; das weltraumerfüllende Medium ist ihm einfach der Aether, dessen Atomen außer der Untheilbarkeit und unendlichen Kleinheit nur die Grundeigenschaften alles Stoffes, Raumerfüllung und Beharrung oder Trägheit, zugeschrieben werden; mit Huyghens setzt er voraus, daß die Aetheratome in sehr schneller Bewegung, vielleicht mit einer Geschw. von 60000 M. begriffen seien. Wie die Geschw. der Luftmoleküle (400 m) 3/2 mal so groß ist als die Gesch. der Luftwellen des Schalles (333 m), so mag auch die Geschw. der Aetheratome 3/2 mal so groß sein als die Geschw. der Aetherwellen des Lichtes, also 3/2 . 40000 = 60000 M. Wie die Luftmoleküle durch ihre Stöße gegen eine Wand eine Gesammtwirkung äußern, die wir als Gasdruck oder Spannung kennen, so bringen die Aetheratome durch ihre Stöße gegen einen Körper eine Gesammtwirkung hervor, die mit Aetherdruck bezeichnet wird; und dieser Aetherdruck ist die Ursache der Gravitation, der allgemeinen Anziehung, sowie sämmtlicher Aeußerungen derselben. Da auch die Elasticität eine Aeußerung der allgemeinen Anziehung ist, so muß auch sie durch die Aethertheorie erklärt werden; darum darf auch den Aetheratomen die Eigenschaft der Elasticität nicht beigelegt werden; es würde ja sonst ein Räthsel durch ein anderes erklärt.

Für den Zusammenstoß eines Aetheratoms mit einem Körpermolekül kommen demnach nur die Gesetze des Stoßes unelastischer Körper (125.) in Anwendung: Wenn zwei Körper in geradem centralem Stoße zusammentreffen, so gehen sie nach dem Stoße zusammen mit gemeinsamer Geschw. weiter; wenn sie aber in schiefem Stoße zusammentreffen, so haben sie nach dem Stoße verschiedene Geschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen, so daß man wohl sagen kann, sie gleiten von einander ab, sie prallen von einander ab, sie reflectiren sich gegenseitig. Indessen zeigt Isenkrahe durch höhere Rechnung, daß die Wirkung der schief erfolgenden Stöße dieselbe ist, als ob 2/3 der Stöße in centraler Richtung stattfänden. Wenn demnach ein Molekül frei und ruhend im Aether schwebt, so erfährt es von allen Seiten dieselbe Wirkung, nämlich die 2/3 aller schiefen Stöße und die wirklich centralen in derselben Richtung; diese Wirkungen heben sich als gleiche und entgegengesetzte einander auf, so daß das Molekül in Ruhe bleibt. Da jedoch die Stöße von allen Seiten unmöglich vollkommen gleichzeitig stattfinden können, so wird es eine zitternde Bewegung annehmen, welche die Wärmeschwingungen einerseits und die Brown'sche Wimmelbewegung anderseits erklären mag; auch müssen diese ebenmäßig von allen Seiten wirkenden Stöße Veränderungen, die etwa im Bau des Moleküls stattgefunden haben, wieder ausgleichen, worin die Eigenschaft der Elasticität ihren Grund haben dürfte, während eine einseitige Steigerung der Stoßbewegung die Dissociation, eine Zersetzung des Moleküls bewirken kann.

Für die Erklärung der Gravitation ist nun die Frage zu beantworten, *welche Verinderung die stoßenden Aetheratome durch ihren Stoß gegen das ruhende Molekül erfahren.* Wenn eine unelastische Kugel gegen eine feste Wand stößt, so ruht ie nach dem Stoße; ebenso erleiden die in schiefem Stoße anprallenden Aetheratome, wie J. durch höhere Rechnung findet, eine solche Verminderung ihrer Geschw., daß diese bis auf $^2/_3$ des ursprünglichen Betrages sinken kann. Diese Verminderung der Geschw. der abgleitenden oder abprallenden Aetheratome spielt die Hauptrolle in der Aethertheorie der Schwerkraft. Stehen zwei Mol. einander gegenüber, so befinden sich offenbar zwischen denselben zahlreiche Aetheratome, die von dem einen Mol. abgeprallt sind und sich daher nach dem anderen mit verminderter Geschw. hinbewegen, während außerhalb der Mol. die Aetheratome mit unverminderter Geschw. gegen die Mol. stoßen. Folglich ist der Aetherdruck zwischen den Molekülen kleiner als der entgegengesetzte Aetherdruck von außen; der letztere ist nicht mehr ganz durch den ersteren aufgehoben, und der Ueberschuß des äußeren Drucks über den inneren wirkt auf die Moleküle zusammentreibend, er wirkt gerade so, als ob in den Mol. Anziehung vorhanden wäre. *Die scheinbare Anziehung entsteht durch das Ueberwiegen des äußeren Aetherdrucks gegen den inneren.*

Nun fragt es sich, ob diese Pseudo-Anziehung auch nach dem Gravitationsgesetze stattfindet; verhältnißmäßig einfach ergibt sich noch das Gesetz der Entfernungen. Der äußere Ueberdruck ist immer gleich der Verringerung des Drucks im Zwischenäther, und diese Verringerung rührt von der Zahl der abgeprallten Aetheratome her, die auf eine gewisse Stelle treffen. Die von einem Molekül reflectirten Atome aber treffen in 2, 3, 4 .... facher Entfernung auf 4, 9, 16 ... fache Kugelflächen; demnach wird eine und dieselbe Stelle in 2, 3, 4 ... facher Entfernung von 4, 9, 16 ... mal weniger abgeprallten Aetheratomen getroffen; die Verringerung des Aetherdrucks im Zwischenäther, also auch die Pseudo-Anziehung wird in 2, 3, 4 ... facher Entfernung 4, 9, 16 ... mal kleiner, steht demnach *im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entfernung.* Hierbei darf man, so lange es sich um große Entfernungen, also um die Gravitation und Schwerkraft handelt, die Entfernung der Schwerpunkte der Mol. mit der Entfernung ihrer Oberflächen verwechseln. Sind jedoch die Moleküle nahe beisammen, so ist die Verwechselung nicht mehr statthaft; bei gegenseitiger Annäherung zweier Moleküle nimmt die Entf. der Oberflächen, also auch die Menge des Zwischenäthers stärker ab als die Abstände der Schwerpunkte; es nimmt daher die Pseudo-Anziehung, die in diesen Fällen *Adhäsion, Cohäsion, Affinität* heißt, stärker zu als in dem umgekehrt quadratischen Verhältnisse der Entfernung.

Wenn hiernach die Deduction des Gesetzes der Entfernungen einfach gelingt, so bietet die Ableitung des Gesetzes der Massen unerwartete Schwierigkeiten. J. geht zunächst von der Betrachtung zweier Einzelmoleküle über zur Untersuchung zweier Schichten gleicher Moleküle; offenbar hängt die Zahl der zwischen den beiden Schichten befindlichen abgeprallten Aetheratome von der Ausdehnung der Schicht und von der Zahl der in ihr enthaltenen Moleküle ab. J. beweist mathematisch, daß die gravitirende Wirkung im zusammengesetzten Verhältnisse zum Volumen und der Dichtigkeit der Schicht steht. Wenn diese Dichtigkeit dieselbe Bedeutung hätte wie bei uns der Ausdruck Dichte (19.), nämlich die Masse der Volumeinheit, so wäre für die Molekülschicht das Gesetz der Massen bewiesen, da das Product aus Volumen und Dichte gleich der Masse ist. Aber bei J. bedeutet Dichtigkeit nur das mehr oder minder nahe Beisammensein der Moleküle in der Schicht. Wenn demnach z. B. eine Schicht Wasserstoff geradesoviel Wasserstoffmoleküle enthält, wie eine gleich große Schicht Sauerstoff Sauerstoffmoleküle hat, so müßte nach Isenkrahes Gesetz die gravitirende Wirkung beider Schichten dieselbe sein, während doch die Schicht Sauerstoff 16 mal soviel wiegt, also auch die 16 fache Schwerkraft besitzt, wie die Schicht Wasserstoff. Um diese Schwierigkeit zu beseitigen, nimmt J. seine Zuflucht zu der von Chemikern und andern Naturforschern oft geäußerten Meinung, die Moleküle der Elemente beständen aus verschiedenen Anzahlen von gleichen Atomen der einen Urmaterie, die vielleicht mit dem Aether identisch sei, z. B. ein Wasserstoffmolekül besteht aus 2, ein Sauerstoffmolekül aus 32 Uratomen. Sicher ist, daß diese Annahme durch neuere Forschungen, z. B. durch Lockyers Spectraluntersuchungen immer mehr Berechtigung gewinnt; wenn wir dieselbe zulassen, so ist auch bewiesen, daß die anziehende Wirkung einer Molekülschicht im geraden Verhältnisse zu ihrer Masse steht. Jedoch entsteht eine neue und noch größere Schwierigkeit bei dem Uebergang von einer Molekülschicht zu einem ganzen Körper.

Wenn nämlich die attractive Wirkung der abgleitenden Aetheratome der Masse eines Körpers proportional sein soll, so muß eine 2te, 3te, ja auch noch die innerste Molekülschicht denselben Einfluß auf den Zwischenäther zweier Körper ausüben, wie die Oberflächenschicht. Bei oberflächlicher Anschauung könnte man sich hierbei in einen circulus vitiosus verwickeln: Die Attraction hängt davon ab, daß die Aetheratome abprallen, aber nicht blos von der Oberfläche, sondern auch von jeder inneren Molekülschicht; prallen sie nun an der

Oberfläche ab, so gelangen sie nicht ins Innere, und die Attraction erscheint der Oberfläche proportional; gelangen sie aber ins Innere, so prallen sie nicht an der Oberfläche ab, und der ganzen Erklärung scheint der Boden entzogen. Bei dieser Uebertreibung der Schwierigkeit würde man aber verschiedene Umstände übersehen, die I. zur Beseitigung der Schwierigkeit benutzt. Zunächst ist für die attractive Wirkung der Aetheratome ja nicht nöthig, daß alle auftretenden Atome zurückgeworfen werden, sondern der kleinste Bruchtheil genügt schon. Sodann ist unzweifelhaft, daß die Entfernung der Moleküle von einander viel größer ist als die Moleküle selbst, daß also bei weitem der größte Theil der unendlich feinen Aetheratome ins Innere des Körpers gelangt und erst von tieferen Schichten reflectirt wird. Weiter werden die meisten Aetheratome, welche die äußeren Schichten treffen, von diesen nicht zurückgeworfen, sondern gleiten nur unter kleinen Ablenkungswinkeln von den Molekülen ab, wobei sie jedoch Geschwindigkeitsverluste erfahren und die attractive Wirkung vermehren; ebenso mögen viele Aetheratome an vielen inneren Molekülschichten abgleiten und dadurch ihre Geschw. vermindern. Endlich werden gewiß auch viele Aetheratome im Innern zwischen verschiedenen Molekülschichten hin- und herreflectirt und erfahren dadurch neue Geschwindigkeitsverluste. Wenn nun hierdurch die Annäherung zur Proportionalität mit den Massen offenbar größer wird, so scheint es dennoch unzweifelhaft, daß die innersten Molekülschichten weniger Aetheratome zurückwerfen und weniger Geschwindigkeitsverluste derselben erzeugen als die äußeren, daß also die gravitirende Wirkung, die Schwerkraft, das Gewicht der inneren Schichten kleiner sein müsse als bei den äußeren. Wenn die Aetherdrucktheorie richtig wäre, so müßte ein großer Körper im zerstückelten Zustande mehr wiegen als im compacten; jedoch könnte, angesichts der großen Annäherung an das Massengesetz, der Unterschied bei gewöhnlichen Körpern nur so gering sein, daß er nur durch feinste Untersuchungen auffindbar sei dürfte, die eben noch nicht angestellt worden sind. Bei den großen Massen der Weltkörper könnte jedoch dieser Unterschied sehr bedeutend werden. Da man nun bisher die Massen der Weltkörper aus ihren attractiven Wirkungen (Aufg. 99 u. 102) bestimmt hat, so müssen die so gefundenen Massen, falls die Aethertheorie Wahrheit wäre, kleiner als die wirklichen Massen sein. Man kann eine Art Bestätigung derselben darin finden, daß die Dichten der großen Körper unseres Sonnensystems, der Sonne, des Jupiter, des Saturn sehr gering, die der kleinen, wie z. B. des Merkur nach der bisherigen Berechnungsweise sehr groß sind.

Wenn die Aethertheorie Wahrheit ist, so müssen noch andere Umstände Einfluß auf die Gravitation haben, die man früher als einflußlos ansah; so die Geschwindigkeit, die Zeit, die Temperatur. Die Vorderfläche eines bewegten Körpers wird offenbar von mehr Aetheratomen getroffen als dessen Rückseite, wodurch die Gravitation eines bewegten Körpers nach der Aethertheorie verschieden von der eines ruhenden sein müßte. Für die anziehende und abstoßende Wirkung elektrischer Ströme hat Weber schon (1847) in seinem elektrodynamischen Grundgesetze ausgesprochen, daß dieselbe nicht blos vom Quadrat der Entfernung, sondern auch von der Geschw. abhänge. Zum Ausdrucke dieser Abhängigkeit wurde jedoch nicht die Anziehung und Abstoßung selbst gewählt, sondern die Arbeit, welche geleistet wird, wenn zwei elektrische Theilchen aus unendlicher Entfernung von einander in die Entfernung r gelangen oder umgekehrt. Da diese Arbeit hierbei als eine Art von Spannkraft, von potentieller Energie erscheint, so wird es wohl verständlich sein, daß man ihr den Namen Potential beigelegt hat. Durch höhere Rechnung läßt sich nun zeigen, daß bei der Geltung von Newtons Gravitationsgesetz das Potential folgende Form annimmt (mm'/r), während Weber für das elektrodynamische Grundgesetz dem Potential die Form gibt $mm'(1 - v^2/c^2)/r$, worin v die Geschw. des sich bewegenden Theilchens und c nahezu = 60000 M., der hypothetischen Geschw. der Aetheratome, welche Zahl Weber aus seinen elektrodynamischen Versuchen erhielt. Zöllner sprach nun 1875 die Meinung aus, das Weber'sche Gesetz sei nicht blos das Grundgesetz der Elektrodynamik, sondern der Wechselwirkung zweier Massen überhaupt, also auch der Gravitation; das Newton'sche sei nur eine sehr starke Annäherung; der Unterschied sei wegen des kleinen v der Himmelskörper so gering, daß er nach Tisserand (1872) in die Grenzen der Beobachtungsfehler falle. Nach diesen Andeutungen wird man mit Isenkrahe wohl annehmen dürfen, daß die Bewegung einen Einfluß auf die Gravitation haben könne. — Zöllner erwog auch 1873 schon die Möglichkeit, daß die Gravitation ähnlich wie das Licht Zeit brauche, um sich von einem Weltkörper auf einen andern fortzupflanzen, und nach der Aethertheorie müßte dies unleugbar stattfinden; Zöllner hält das Horizontalpendel (538.) für geeignet, darüber Untersuchungen möglich zu machen, und Isenkrahe erklärt diese Versuche als entscheidend über die Richtigkeit der Aethertheorie. — Unzweifelhaft ist auch die Temperatur von Einfluß, wenn die Aethertheorie richtig ist; die Möglichkeit, ja Nothwendigkeit dieses Einflusses betonte schon (1876) Secchi in seiner „Einheit der Naturkräfte“, welche ebenfalls eine Aethertheorie enthält und die Elasticität der Aetheratome verwirft, dieselbe jedoch durch eine ungenügende Rotation der Atome ersetzt.

muß eine Ursache haben. Unter Ursache wird hierbei nicht die Bedingung, sondern der zureichende Grund einer Wirkung verstanden, d. h. die Vorgänge, welche die Wirkung vollständig erklären; so ist z. B. die Ursache des Fallens eines aus unserer Hand losgelassenen Steines nicht das Loslassen, welches nur eine Bedingung ist, sondern die Anziehung der Erde. Die Ursachen der Veränderungen sind also dasjenige, was wir Kräfte nennen und für welche (nach Wundt) folgende 6 Axiome stattfinden.

1. **Alle Ursachen sind Bewegungsursachen.** Keine Kraft bringt irgend eine andere Wirkung hervor, als eine Bewegung; alle Veränderungen in der Natur sind nur Bewegungen, entweder der ganzen Körper, oder ihrer kleinsten Theilchen. Denn andere Veränderungen an Körpern, als Umwandlung des Stoffes oder Umwandlung der Lage der Theilchen oder des ganzen Körpers sind nicht denkbar. Stoffumwandlungen hat man früher für möglich gehalten; eine tausendjährige Erfahrung hat sie als unmöglich gezeigt; folglich können die Veränderungen nur in Bewegung bestehen. Die neuere Physik kann dieses Axiom noch in dem weiteren Sinne fassen, daß nicht blos die Wirkung jeder Kraft, sondern auch die Kraft selbst in einer Bewegung beruhe; denn wir erzeugen ja häufig eine Kraft aus der anderen, also muß die erzeugte Kraft, weil sie eine Wirkung ist, Bewegung sein. Außerdem sehen wir aus jeder verschwindenden Bewegung eine gleichwerthige Bewegung hervorgehen, so daß keine einmal vorhandene Bewegung verschwinden kann. Gäbe es nun Kräfte, welche Bewegung erzeugten, ohne Bewegung zu sein, ohne also durch Abgeben von Bewegung eine solche zu erzeugen, so könnte die Summe der vorhandenen Bewegung vermehrt werden, sie müßte unter unseren Augen ins Unendliche zunehmen. 87

2. **Jede Bewegungsursache liegt außerhalb des Bewegten.** Ein sich vollkommen selbst überlassener Körper erfährt keine Veränderung; daß organische Körper, welche ganz abgeschlossen sind, sich dennoch zersetzen, ist kein schlagender Einwurf gegen diese Behauptung; denn ein organischer Körper besteht aus mehreren Körpern, die auf einander einwirken. Wenn wir dennach keine Veränderung finden ohne Einwirkung eines anderen Körpers, so muß jede Bewegungsursache außerhalb des Bewegten liegen. Indeß ist „außerhalb" nicht so zu verstehen, daß ein Körper durch einen absolut leeren Raum auf einen andern wirken könne, daß es also eine *Fernewirkung* gebe; die neuere Physik setzt vielmehr voraus, daß bei der Einwirkung entweder eine unmittelbare Berührung der beiden Körper stattfinde oder daß dieselben durch einen Zwischenstoff, ein Medium, mittelbar verbunden seien. 88

3. **Alle Bewegungsursachen (Kräfte) wirken in der geraden Verbindungslinie ihres Ausgangs- und ihres Angriffspunktes.** Wir sehen einen Stein in gerader Linie zur Erde fallen, ein Stück Eisen nähert sich in gerader Linie einem Magnet, ein elektrischer Körper stößt einen gleichnamig elektrischen in gerader Linie ab, alle krummlinigen Bewegungen erklären sich aus zwei oder mehreren geradlinigen, die in die Verbindungsgraden zwischen Kraft und bewegten Körper fallen. So ergibt sich das dritte Axiom als Ausfluß tausendfältiger Erfahrung. Früher führte man für die geradlinige Wirkung den Grund an, die gerade Linie sei die einfachste; dieser Grund hat eben so wenig Gewicht, als derjenige der antiken und mittelalterlichen Forscher für die Kreisbewegung der Welten; dieselben fanden nämlich den Grund dieser Bewegungsform darin, daß der Kreis die vollkommenste Figur sei. — Aus dem dritten Axiom können wir zwei Folgerungen ziehen, die gewöhnlich ebenfalls als mechanische Axiome aufgestellt werden: a. Der Angriffspunkt einer Kraft kann in der Richtung derselben beliebig verlegt werden, vorausgesetzt, daß hiermit die Größe der Kraft nicht verändert wird; denn das zweite Element der Kraft, ihre Richtung wird durch jene Verlegung eben nach dem dritten Axiom nicht geändert. b. Zwei gleiche und gerade entgegengesetzte Kräfte, die auf einen Körper wirken, heben einander auf. Denn gleiche Kräfte sind solche, die in einer und derselben Masse gleiche Bewegung erzeugen; da diese Kräfte in *einer* Geraden wirken, so müssen auch die beiden von ihnen erzeugten Bewegungen in *einer* Geraden liegen; von diesen beiden gleichen, in einer Geraden liegenden Bewegungen geschieht die eine ebenso viel vorwärts als die andere rückwärts, weil die Kräfte entgegengesetzt sind; folglich gelangt der Körper wieder in seine Stelle. Es ist nun einerlei, ob die Bewegungen endlich oder unendlich klein seien; die Schlußwirkung ist in beiden Fällen, sowohl bei nach einander folgender, als bei gleichzeitiger Wirkung der beiden Kräfte, gleich Null. c. Wenn zwei gleiche Kräfte unter einem Winkel auf einen Körper wirken, so schlägt derselbe eine Richtung ein, die den Winkel halbirt; denn durch die erste Kraft wird er aus der Richtung der zweiten gedrängt und durch die zweite aus der Richtung der ersten. Weil die beiden Kräfte einander gleich sind, so muß demnach die Richtung des Körpers von den Richtungen der beiden Kräfte um gleichviel weggedrängt sein, also in der Mitte zwischen beiden Richtungen liegen. 89

schon in Schwingungen begriffen, welche eben, wie oft erwähnt, die Wärme des Körpers bilden; mit steigender Temperatur wächst auch die Schwingungszahl, so daß sie bei 500° auf 400 Billionen Schwingungen angewachsen ist, die Wärme und Licht bilden. Die farblosen, durchsichtigen Gase sind in geringen Mengen nicht sichtbar, wohl aber in großen Mengen, wie uns der blaue Schleier ferner Berge, noch mehr aber das Himmelsblau zeigen; aber selbst diese Gase können auch in geringen Mengen sichtbar, ja selbstleuchtend werden, indem man sie in fein verdünntem Zustande in Geißler'sche Röhren einschließt und einen elektrischen Funkenstrom durchgehen läßt. Viele Körper strahlen auch bei gewöhnlicher Temperatur ein schwaches, nur im Dunkeln sichtbares Licht aus, eine Erscheinung, die man Phosphorescenz nennt. Nach diesen Andeutungen ist man wohl berechtigt, das Licht zu den allgemeinen Kräften zu rechnen.

84 4. **Der Magnetismus.** Ein Magnet ist ein Eisenkörper, der die Eigenschaft hat, Eisen anzuziehen und festzuhalten; dies ist die alte Definition des Magnets. Die neueren Forschungen haben indeß ergeben, daß ein hinreichend starker Magnet nicht blos Eisen, sondern auch viele anderen Körper anzieht; und diejenigen, welche er nicht anzieht, werden von ihm abgestoßen. Diese Wirkung des Anziehens und Abstoßens erklärt sich nun, wie in der 8. Abtheilung gelehrt wird, schließlich dadurch, daß jeder angezogene oder abgestoßene Körper während des Anziehens oder Abstoßens selbst ein Magnet ist; demnach ist der Magnetismus ebenfalls eine allgemeine Kraft. Das Wesen dieser Kraft ist uns nicht mehr ganz verschlossen, da dieselbe durch Ampères Theorie auf elektrische Ströme zurückgeführt wird.

85 5. **Die Elektricität.** Ein elektrischer Körper hat die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen und nach der Berührung abzustoßen. Ein Glasstab, eine Glasscheibe werden durch Reiben mit Kautschuk elektrisch; ihre Elektricität läßt sich in größerer Menge in einer Blechkugel ansammeln, die man Conductor nennt. Ein Conductor enthält ruhende oder statische Elektricität, in den Telegraphendrähten ist fließende oder dynamische Elektricität, ein elektrischer Strom. Wird nun ein unelektrischer Körper in die Nähe eines elektrischen gebracht, so wird jener selbst elektrisch, ohne jedoch seine Elektricität durch Mittheilung von diesem erhalten zu haben. Dies erklärt sich, wie die 9. Abtheilung lehrt, schließlich dadurch, daß in jedem Körper schon Elektricität vorhanden ist, aber durch eine gleiche Menge einer zweiten, entgegengesetzten Art von Elektricität aufgehoben wird; demnach ist auch die Elektricität eine allgemeine Kraft. Dies ist leicht verständlich, wenn Edlunds neue elektrische Theorie sich bestätigt, nach welcher die Elektricität identisch ist mit dem allverbreiteten Aether.

---

4. Allgemeine Sätze. Axiome.

86 Unter allgemeinen Sätzen, physikalischen Grundsätzen oder Axiomen verstehen wir solche Wahrheiten, welche sich nicht mehr aus anderen Wahrheiten ableiten lassen, deren Geltung aber stillschweigend oder ausdrücklich bei den physikalischen Folgerungen vorausgesetzt wird, gerade so, wie allen mathematischen Beweisen und Schlüssen eine Reihe von Axiomen zur Grundlage dient. Doch tritt zwischen den mathematischen und den physikalischen Axiomen sofort ein bedeutender Unterschied hervor: während man die ersteren längst anwandte, ehe man sie aussprach, und wohl Mancher sie noch jetzt anwendet, ohne sich über ihre Geltung Rechenschaft zu geben, sind die physikalischen Axiome ein Resultat langer Erfahrung, ein Ausfluß gereinigter Forschung; ja manche konnten erst nach langem Kampfe mit entgegengesetzten Anschauungen durchdringen, bei anderen wurde die vollständige Bedeutung erst spät, oder ist vielleicht jetzt noch nicht in ihrem ganzen Umfange erkannt. Außerdem sind die mathematischen Axiome Jedem verständlich, der nur die Grundbegriffe der Größenlehre kennt; die physikalischen Axiome dagegen kommen erst dann zur vollständigen Klarheit, wenn man das ganze Gebiet der Physik übersehen kann. Da wir nun in unserer Einleitung einen Ueberblick über dies Gebiet zu gewinnen versucht haben, so können wir jetzt auch die Anführung der physikalischen Axiome vornehmen. Als Grundlage für dieselben und für die ganze physikalische Forschung gilt das Causalgesetz: Jede Wirkung, jede Veränderung

Erster Theil der Physik.

Die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik.

Erste Abtheilung.

Die Mechanik der festen Körper oder die allgemeine Mechanik.

1. Die Lehre vom Gleichgewichte oder die Statik.

Das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten (Johann Bernoulli 1717). 93
Eine Veränderung wird an einem Körper nur hervorgebracht, wenn Kräfte auf denselben einwirken. Doch können auch Kräfte auf einen Körper wirken, ohne eine Veränderung zu erzielen; man sagt dann: die Kräfte sind im Gleichgewichte. *Kräfte sind also im Gleichgewichte, wenn sie keine Veränderung an dem Körper hervorbringen, auf welchen sie wirken.* Der Körper kann sich hierbei im Zustande der Ruhe oder im Zustande der Bewegung befinden. Wenn ein Körper in Bewegnng ist, und wenn die auf ihn wirkenden Kräfte im Gleichgewichte sind, so geht er nach dem Gesetze der Trägheit mit unveränderter Bewegung weiter.

Das Gleichgewicht der Kräfte kommt besonders bei den Maschinen zur Anwendung; wenn die bewegenden Kräfte an einer Maschine mit den Widerständen im Gleichgewichte sind, so ist die Maschine im Beharrungszustande, sie arbeitet ungestört weiter. Ein Eisenbahnzug z. B. oder ein Dampfschiff läuft mit derselben Geschwindigkeit weiter, wenn die Dampfmaschinenkraft jeden Moment im Gleichgewichte ist mit der Reibung, dem Widerstande der Luft, des Wassers u. s. w. Ist die Wirkung der Dampfmaschine größer als die Wirkung der Widerstände, wie dies im Anlaufe der Fall sein muß, so nimmt die Geschwindigkeit zu; ist aber die Wirkung der Widerstände überwiegend, so nimmt die Geschwindigkeit ab, ein Fall, der insbesondere beim Endlaufe eintritt. Der Beharrungszustand oder Fortlauf einer Maschine ist aber der Zweck derselben; folglich ist das Gleichgewicht an bewegten Körpern wichtiger als an ruhenden. Es wird daher auch richtiger sein, die Gesetze des Gleichgewichtes an bewegten Körpern zu finden, als, wie es gewöhnlich geschieht, an ruhenden.

Eine bewegte Masse geht mit unveränderter Geschwindigkeit fort, wenn keine Vermehrung oder Verminderung der lebendigen Kraft stattfindet. Dies ist nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft nur dann möglich, wenn die von Kräften producirte Arbeit immer durch die Gegenwirkung anderer Kräfte consumirt wird, wenn also die producirte Arbeit der von Gegenkräften, von Widerständen, von einer Last consumirten Arbeit gleich ist. Denn müßte, um Gleichgewicht hervorzubringen, die producirte Arbeit größer sein als die consumirte, so würde der Ueberschuß der producirten Arbeit verzehrt, ohne eine Wirkung hervorzubringen, es wäre Arbeit vernichtet, was dem Princip widerspricht; und wenn die producirte Arbeit kleiner wäre als die consumirte, so wäre der Ueberschuß der consumirten Arbeit neu entstanden, es wäre Arbeit aus nichts erschaffen, was ebenfalls dem Princip widerspricht; folglich *ist die producirte Arbeit im Falle des Gleichgewichtes gleich der consumirten Arbeit.* Arbeit ist aber das

90 4. **Die Wirkung jeder Ursache verharrt.** Dieses Axiom haben wir schon in etwas anderer Form unter dem Namen „das Gesetz der Trägheit" oder „das erste Gesetz der Mechanik" kennen gelernt und unter den „allgemeinen Eigenschaften" betrachtet; wir konnten aber gerade deßhalb, weil die Eigenschaft der Trägheit ein Axiom ist, dieselbe dort nicht aus dem Begriffe der Materie ableiten. Die allgemeinere Fassung, welche hier das Axiom hat, spricht zugleich aus, daß auch der Zustand der Ruhe ein Resultat vorhergegangener Wirkung ist, in welchem der Körper verharrt. Dieselbe betont auch besonders, daß eine frühere Wirkung durch eine spätere wohl verändert, aber nicht vernichtet wird, daß also ganz gleiche Wirkungen sich summirt in einem Körper anhäufen. Von dem Gesetze der Trägheit in diesem Sinne haben wir schon öfter Anwendung gemacht, z. B. bei der Betrachtung der beschleunigten Bewegung und der Wirkung einer constanten Kraft. Bringt nämlich eine constante Kraft, wie z. B. die Schwere, in jeder Secunde in einem Körper eine und dieselbe Geschwindigkeit hervor, so wird die Geschwindigkeit in t Sec. t mal so groß als in 1 Sec., weil die früheren Geschwindigkeiten in dem Körper noch vorhanden sind, wenn die späteren dazu kommen. Man setzt indeß hierbei das zweite Newton'sche Gesetz der Mechanik voraus, daß nämlich eine Kraft auf einen bewegten Körper gerade so wirkt wie auf einen ruhenden; dies ist auch der Fall, wenn der Körper nicht etwa wie ein im fließenden Wasser schwimmender Körper der Wirkung der Kraft ausweicht. Sonst spricht für die Richtigkeit jener Voraussetzung vielfältige Erfahrung. Es bedarf zu irgend einer Arbeit auf einem fahrenden Dampfschiffe derselben Kraft, wie auf ruhender Erde; es erfordert dieselbe Pulvermenge, nach Osten zu schießen, wie nach Westen u. s. w. Unter Geltung dieser Voraussetzung können wir aus dem vierten Axiome noch eine Folgerung ziehen, die man häufig zum Beweise des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte benutzt. Diese Folgerung heißt: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nacheinander auf einen Körper wirken. Denn die Wirkung der ersten Kraft beharrt im letzten Falle, bis die zweite dazu kommt, welche dann dieselbe Wirkung ausübt, wie auf den Körper im Ruhezustande, und daher die Wirkung der ersten Kraft ebenso verändert, wie es bei gleichzeitiger Wirkung geschehen wäre.

91 5. **Jeder Wirkung entspricht eine gleiche Gegenwirkung** oder jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft (actio est par reactioni), das dritte Newton'sche Gesetz der Mechanik. Denn hat eine Kraft eine Zeit lang auf einen Körper gewirkt, so ist in dem Träger jener Kraft der zur Wirkung verbrauchte Kraftbetrag nicht mehr vorhanden, wurde also während des Vorganges aufgehoben; dieses Aufheben einer Kraft ist aber nur durch eine ganz gleiche und entgegengesetzte Gegenkraft möglich. Wenn wir so das fünfte Axiom aus einer Folgerung des dritten ableiten, so spricht doch auch alle Erfahrung für dasselbe. Stoßen wir heftig wider eine Wand, so erhalten wir einen ebenso starken Rückstoß; durch diesen Rückdruck bewegen wir z. B. mittels einer gegen den Boden gedrückten Stange einen Kahn, einen Schlitten. Ziehen wir an einem Seile, so hält uns dies mit ebenso großer Kraft fest: denn wir fallen zu Boden, wenn das Seil reißt. Ein Magnet zieht Eisen an, wird aber auch von dem Eisen angezogen. Zusammengepreßte Luft schiebt den Kolben wieder in die alte Stellung zurück. Das Axiom besagt also nicht blos, daß zur Aufhebung eines gewissen Widerstandes eine gleiche Kraft nöthig ist, sondern daß niemals eine isolirte Wirkung stattfindet, daß alle Kräfte gegenseitig sind.

92 6. **Jede Wirkung ist äquivalent ihrer Ursache** (causa aequat effectum), d. h. jede Kraft bringt eine Wirkung hervor, die wieder eine ebenso große Wirkung erzeugen kann wie jene Kraft, und daher selbst eine ebenso große Kraft ist; oder Kraft kann durch Wirkung nicht vernichtet, sondern nur verwandelt, und ebenso wenig aus nichts erschaffen werden. Wir haben dieses Axiom schon kennen gelernt als „das Princip von der Erhaltung der Kraft", und haben dasselbe ausführlich zu beweisen und an vielen Beispielen zu erhellen gesucht, weil dasselbe vielfach der gewöhnlichen Erfahrung zu widersprechen scheint und daher auch das neueste der Axiome ist; es hat erst durch die genauen Versuche von Joule und Hirn über die Verwandlung von Arbeit in Wärme und von Wärme in Arbeit in unseren Tagen seinen bestimmtesten Erfahrungsnachweis erhalten. (Siehe 35 u. 36.)

Erster Theil der Physik.

Die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik.

Erste Abtheilung.

Die Mechanik der festen Körper oder die allgemeine Mechanik.

1. Die Lehre vom Gleichgewichte oder die Statik.

Das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten (Johann Bernoulli 1717). 93
Eine Veränderung wird an einem Körper nur hervorgebracht, wenn Kräfte auf denselben einwirken. Doch können auch Kräfte auf einen Körper wirken, ohne eine Veränderung zu erzielen; man sagt dann: die Kräfte sind im Gleichgewichte. Kräfte sind also im Gleichgewichte, wenn sie keine Veränderung an dem Körper hervorbringen, auf welchen sie wirken. Der Körper kann sich hierbei im Zustande der Ruhe oder im Zustande der Bewegung befinden. Wenn ein Körper in Bewegnng ist, und wenn die auf ihn wirkenden Kräfte im Gleichgewichte sind, so geht er nach dem Gesetze der Trägheit mit unveränderter Bewegung weiter.

Das Gleichgewicht der Kräfte kommt besonders bei den Maschinen zur Anwendung; wenn die bewegenden Kräfte an einer Maschine mit den Widerständen im Gleichgewichte sind, so ist die Maschine im Beharrungszustande, sie arbeitet ungestört weiter. Ein Eisenbahnzug z. B. oder ein Dampfschiff läuft mit derselben Geschwindigkeit weiter, wenn die Dampfmaschinenkraft jeden Moment im Gleichgewichte ist mit der Reibung, dem Widerstande der Luft, des Wassers u. s. w. Ist die Wirkung der Dampfmaschine größer als die Wirkung der Widerstände, wie dies im Anlaufe der Fall sein muß, so nimmt die Geschwindigkeit zu; ist aber die Wirkung der Widerstände überwiegend, so nimmt die Geschwindigkeit ab, ein Fall, der insbesondere beim Endlaufe eintritt. Der Beharrungszustand oder Fortlauf einer Maschine ist aber der Zweck derselben; folglich ist das Gleichgewicht an bewegten Körpern wichtiger als an ruhenden. Es wird daher auch richtiger sein, die Gesetze des Gleichgewichtes an bewegten Körpern zu finden, als, wie es gewöhnlich geschieht, an ruhenden.

Eine bewegte Masse geht mit unveränderter Geschwindigkeit fort, wenn keine Vermehrung oder Verminderung der lebendigen Kraft stattfindet. Dies ist nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft nur dann möglich, wenn die von Kräften producirte Arbeit immer durch die Gegenwirkung anderer Kräfte consumirt wird, wenn also die producirte Arbeit der von Gegenkräften, von Widerständen, von einer Last consumirten Arbeit gleich ist. Denn müßte, um Gleichgewicht hervorzubringen, die producirte Arbeit größer sein als die consumirte, so würde der Ueberschuß der producirten Arbeit verzehrt, ohne eine Wirkung hervorzubringen, es wäre Arbeit vernichtet, was dem Princip widerspricht; und wenn die producirte Arbeit kleiner wäre als die consumirte, so wäre der Ueberschuß der consumirten Arbeit neu entstanden, es wäre Arbeit aus nichts erschaffen, was ebenfalls dem Princip widerspricht; folglich ist die producirte Arbeit im Falle des Gleichgewichtes gleich der consumirten Arbeit. Arbeit ist aber das

Product der Kraft mit dem durch ihren Angriffspunkt in der Kraftrichtung zurückgelegten Wege. Man muß demnach, um die Bedingung des Gleichgewichtes zu finden, die Wege aufsuchen, welche die Angriffspunkte unter dem Einflusse dieser Kräfte in den Richtungen derselben zurücklegen würden; man muß sodann diese Kräfte mit den Wegen multipliciren, und die so erhaltenen Arbeiten der gegeneinander wirkenden Kräfte einander gleich setzen. Die entstehende Gleichung ist die gesuchte Bedingung des Gleichgewichtes. Diese gilt dann nothwendig auch für den Zustand der Ruhe; denn dieser Zustand ist ja nach der neueren Physik nur das Resultat fortdauernder entgegengesetzter, aber unendlich kleiner Bewegung; die eine Kraft oder Summe von Kräften bewegt den Körper in jedem Augenblicke um ebenso viel nach der einen Richtung, als ihn die andere Kraft oder Kraftsumme nach der entgegengesetzten Richtung bewegt. Dieses ist wiederum nur möglich, wenn die Arbeit der einen Kraft gleich ist der Arbeit der anderen Kraft. Um aber diese Arbeiten zu finden, muß man dem Körper in Gedanken eine durch die Kräfte erzeugbare, unendlich klein zu denkende Bewegung ertheilen, die Wege der Angriffspunkte in den Richtungen der Kräfte aufsuchen aus dem geometrischen Zusammenhange des Körpers und der Kräfte, und dann die Producte der Wege mit den Kräften einander gleichsetzen. Dieses Verfahren stimmt ganz mit dem für bewegte Körper überein. Man hat dasselbe zuerst für ruhende Körper angewandt und die unendlich kleinen Wege „virtuelle Geschwindigkeiten" genannt; daher heißt man diese allgemeine Gleichgewichtsbedingung das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten. Man kann dasselbe so aussprechen: *Wenn Kräfte an einem ruhenden oder bewegten Systeme im Gleichgewichte sind, so muß die Summe der Arbeiten, welche während eines beliebigen Zeittheilchens von den nach einer Richtung wirkenden Kräften geleistet werden, gleich sein der Summe der Arbeiten, welche von den nach der anderen Richtung wirkenden Kräften in demselben Zeittheilchen geleistet werden, oder die algebraische Summe aller Arbeiten muß gleich Null sein.* Dieser Satz ist die *allgemeine Gleichgewichtsbedingung.*

94 **Gleichgewicht an Maschinen.** Eine Maschine ist eine Verbindung widerstandsfähiger Körper, welche so eingerichtet ist, daß mittels ihrer mechanische Naturkräfte genöthigt werden können, unter bestimmten Bewegungen zu wirken (Definition von Reuleaux, theoretische Kinematik). Fassen wir der Einfachheit wegen zunächst den Fall ins Auge, daß mittels der Maschine nur eine Naturkraft wirksam werden solle; das Wirken einer Naturkraft mittels einer Maschine besteht gewöhnlich in der Ueberwindung eines Widerstandes; wir wollen denselben kurzweg mit Last (Q) bezeichnen und den Druck oder Zug, den die wirksame Naturkraft ausübt, kurzweg mit Kraft (P). Der Zweck der Maschine ist gewöhnlich der Beharrungszustand, d. i. der Zustand, in welchem die Maschine mit unveränderter Geschwindigkeit weiter läuft, in welchem also Kraft und Last im Gleichgewichte sind; dieser Zustand ist nach dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten erreicht, wenn die Arbeit der Kraft ebenso groß ist als die Arbeit der Last. *An einer Maschine ist Gleichgewicht, wenn die Arbeit der Kraft gleich ist der Arbeit der Last.*

Bezeichnen wir die Wege der Angriffspunkte von Kraft und Last mit s und s', so ist diese Bedingung durch die Gleichung ausgedrückt $Ps = Qs'$, woraus sich ergibt $P : Q = s' : s$, d. h. die Kraft verhält sich zur Last umgekehrt wie die Wege der Angriffspunkte. Hat demnach die Maschine eine solche Einrichtung, daß die Last nur einen sehr kleinen, die Kraft aber einen großen Weg zurücklegt, so ist s' sehr klein gegen s; folglich muß auch P in demselben Verhältnisse sehr klein

2. **Der Widerstand des Mediums** besteht darin, daß der sich bewegende Körper wegen der Undurchdringlichkeit die vor ihm liegende Luft oder das Wasser zur Seite drängen muß, um deren Stelle einnehmen zu können, und daß für diese Arbeit ein Theil seiner lebendigen Kraft aufgezehrt wird. Schon Newton (1680) fand, daß dieser Widerstand dem Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers proportional ist; genauere Forschungen ergaben, daß für langsame Bewegungen die erste Potenz ausreicht, und daß für sehr rasche Bewegungen auch noch die dritte Potenz hinzugenommen werden muß, woraus sich der paradoxe Schluß ziehen läßt, daß durch allzu große Geschwindigkeit ein im Wasser fallender Stein von selbst zur Ruhe kommen müßte. Auch ist dieser Widerstand der Dichte des Mediums und der Größe des zur Bewegung senkrechten Querschnittes proportional. Die Wirkung des Widerstandes hängt endlich von der Masse des Körpers ab; die kleine lebendige Kraft eines leichten Körpers ist von dem Widerstande der Luft bald aufgezehrt, besonders wenn derselbe einige Größe im Verhältnisse zu seinem Gewichte besitzt; daher sinken Federn in der Luft langsam zu Boden, und die Dunstbläschen scheinen ruhig zu schweben, während die kleine, schwere Bleikugel in der Luft fast so wie im leeren Raume fällt. So kraftverzehrend der Widerstand des Mediums auch ist (die Kraft der Dampfschiffe wird hierdurch allein fast aufgezehrt), so hat er doch auch nützliche Anwendungen, wie zu Fallschirmen, zur Regulirung des Ganges von Maschinen z. B. von Uhrschlagwerken durch Windfänge, sodann zum Schlämmen, zum Absondern von Spreu; endlich zum künstlichen Schwimmen, zum Rudern und Fliegen. Auch mildert er die Stärke des Falles; z. B. ein 10 Sec. lang fallendes Hagelkorn von 1^{g} würde ohne den Luftwiderstand eine lebendige Kraft von $^{1}/_{2}{}^{mk}$ haben, also zerstörend wie eine geschossene Pistolenkugel wirken.

3. **Die Steifigkeit der Seile** verursacht einen Widerstand, weil sowohl zum Krümmen als zum Geradstrecken eine Kraft erforderlich ist. Diese Kraft wächst (nach Eytelwein 1808) mit der Spannung des Seiles, welche nach Axiom 5. der Zugkraft gleich ist, und mit dem Querschnitte des Seiles, ist aber dem Halbmesser der Rollen und Walzen umgekehrt proportional. Nach Weißbach (1848) sind neue Seile steifer als gebrauchte, getheerte um $^{1}/_{6}$ steifer als ungetheerte.

Einfache Maschinen oder mechanische Potenzen (Pappus 500 n. Chr.)

Bei der Betrachtung der Gesetze des Gleichgewichtes an Maschinen sehen wir zunächst von den drei zuletzt betrachteten Widerständen ab und denken uns nur eine Last an demselben, welche durch die Kraft im Gleichgewichte gehalten werden soll. — Alle Maschinen, so verwickelt ihre Construction auch sei, bestehen aus verhältnißmäßig nur wenigen, eigentlich wirksamen Elementen, die man einfache Maschinen nennt; diese sind: der **Hebel**, die Rolle, das Rad an der Welle, die schiefe Ebene und die Schraube, der Keil.

96 1. **Der Hebel** (Archimedes 220 v. Chr.). Der Hebel ist eine an einem Punkte unterstützte unbiegsame Stange, auf welche an verschiedenen Punkten Kräfte wirken. Denken wir uns den Hebel als eine gewichtlose Linie, so haben wir den mathematischen Hebel; jeder wirkliche Hebel ist ein physischer Hebel, bei dessen Betrachtung auch sein eigenes Gewicht in Rechnung gezogen werden muß. Der einfachste Fall ist, daß an einem mathematischen Hebel ein Gewicht (die Last) durch eine Kraft gehoben oder in Ruhe gehalten wird. Liegt der Stützpunkt (Hypomochlion) zwischen den Angriffspunkten von Kraft und Last, so nennt man den Hebel **zweiarmig**; der zweiarmige Hebel kann gleicharmig oder ungleicharmig sein. Liegen die Angriffspunkte an einer Seite des Stützpunktes, so heißt der Hebel **einarmig**. Ursprünglich nannte man die zwei Stücke des Hebels vom Stützpunkte bis zu den Angriffspunkten die beiden Hebelarme; man ist indeß übereingekommen, unter Hebelarm allgemeiner die Entfernung des Stützpunktes von der Kraftrichtung zu verstehen, welche Entfernung nur bei senkrechter Kraftrichtung mit der Länge der wirklichen Arme des Hebels zusammenfällt. Unter dieser Voraussetzung gilt für alle Hebelarten und für jede beliebige Richtung der Kräfte das Gesetz: **Am Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn Kraft und Last sich umgekehrt verhalten wie die beiden Hebelarme.**

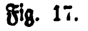
eines Körpers über einen anderen; eine besondere Art derselben ist die *Zapfenreibung*, welche bei der Drehung eines Cylindermantels auf der Innenfläche eines Hohlcylinders (liegende Zapfen) oder bei der Drehung einer Grundfläche auf einer anderen (stehende Zapfen) eintritt. b. Die *rollende Reibung* d. i. den Widerstand beim Rollen eines runden Körpers über eine Fläche. Die rollende Reibung ist kleiner als die gleitende, weil durch die Rollbewegung selbst die Unebenheiten der einen Fläche über die der anderen gehoben werden.

Wegen des verwickelten Ursprunges der Reibung gibt es keine allgemein giltigen Gesetze über dieselbe. Innerhalb sehr enger Grenzen gelten folgende von Coulomb (1781) und von Morin (1831) gefundenen Gesetze: 1. Die Größe der Reibung, d. i. der Kraftbetrag zur Ueberwindung der Reibung, auch kurzweg die Reibung genannt, ist direct proportional dem Drucke der beiden Körper gegen einander. Man nennt den Bruchtheil des Druckes, der zur Ueberwindung der Reibung nothwendig ist, den Reibungscoëfficient, bezeichnet mit f; folglich ist die Reibung, wenn D den Druck bedeutet, $= fD$. 2. Die Reibung ist unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen; denn wenn auch durch die Vergrößerung der Flächen die Zahl der zu überschreitenden Unebenheiten zunimmt, so nimmt der hierbei zu überwindende Druck auf ein Flächenelement in demselben Maße ab. 3. Der Reibungscoëfficient ist um so größer, je rauher und je weicher die Körper sind; er wird durch Polieren und Schmieren verkleinert, durch Wärme vergrößert. Er ist größer beim Uebergange aus Ruhe in Bewegung (statische Reibung) als in der Bewegung selbst (kinetische Reibung), und unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung. Zwischen gleichartigen Körpern ist er größer als für verschiedenartige. Er beträgt für Holz auf Holz in der Bewegung (trocken) $^1/_3$, (geschmiert) $^1/_{10}$, für Metall auf Metall (trocken) $^1/_6$, (geschmiert) $^1/_{14}$, für Holz auf Metall (trocken) $^1/_5$, (geschmiert) $^1/_{12}$. Für Zapfenreibung ist f durchschnittlich $^1/_{12}$, für rollende Reibung $^1/_{30}$. Diese Gesetze gelten nach Untersuchungen von Rennie, Hirn, Sella nicht mehr für die Flächendrucke und die Geschwindigkeiten, die in der Maschinenpraxis vorkommen. Sie gelten auch nicht mehr, wo der Druck allzu klein ist, z. B. in Uhrwerken, und wo die sich berührenden Stoffe weich, stark faserig, haarig sind, sich stark abreiben oder in einander einschneiden. Die Zapfenreibung ist kleiner bei alten als bei neuen Zapfen; ihr Coëfficient ist so klein, weil sich die Unebenheiten allmälig Bahnen schleifen. Da die rollende Reibung so viel kleiner ist als die gleitende, so ist es eine große Ersparniß an Kraft, die gleitende Reibung mittels sogenannter Frictionsrollen, wie z. B. an Klavier- und Möbelfüßen in rollende zu verwandeln. Umgekehrt verwandelt man die rollende Reibung der Wagenräder durch Hemmschuhe in gleitende, um an Abhängen die Widerstände zu vergrößern. In ähnlicher Weise macht man mittels der Bandbremsen und der Tauwindungen häufig Anwendung von der Reibung, um Bewegungen von Maschinen und Lasten zu hemmen oder zu verzögern. Ueberhaupt hat die Reibung noch mancherlei Nutzen. Ohne Reibung der Stützflächen am Boden würden weder Menschen, noch Thiere, weder gewöhnliche, noch Eisenbahnwagen sich fortbewegen können, und nur durch sehr verstärkte Reibung mittels sehr schwerer Locomotiven sind Bergeisenbahnen möglich; alles Stehende, Liegende, Angehängte würde ohne Reibung bei dem geringsten Anstoße sich fortbewegen und fallen, alles Zusammengeheftete würde auseinander fallen, alle einander nahen Körper würden zusammenlaufen, wenn die Reibung nicht wäre. Das ganze Maschinenwesen wäre ohne die Reibung unmöglich; denn durch die Reibung übertragen Räder, Rollen, Riemenscheiben die Bewegungen. Pronys *Bremse* beruht auf der Reibung.

Neueste Forschungen über die Reibung erstrecken sich besonders über den Einfluß der Geschw. auf die Reibung, scheinen jedoch durch die Verschiedenheit der Resultate anzudeuten, daß der Stoff von großem Einfluß auf die Gesetze der Reibung ist. Während eine Untersuchung von Warburg und v. Babo (1877) die von Coulomb und Morin aufgestellte *Unabhängigkeit der Reibung von der Geschw.* sogar als „charakteristisches Gesetz der Reibung fester Körper" ausspricht, erklärt Bochet, daß die Reibung mit zunehmender Geschw. abnimmt, und Hirn, daß sie mit zunehmender Geschw. zunimmt. Kimball findet (1877), daß sie bei kleinen Geschwindigkeiten mit wachsender Geschw. rasch zunimmt, dann allmälig langsamer wächst, nachher häufig bei noch wachsender Geschw. längere Zeit constant bleibt, aber nach längerer Beibehaltung dieses Maximums mit weiter wachsender Geschw. wieder abnimmt. Im Gegensatze hierzu stehen wieder die Resultate von Jenkin und Ewing (1867), welche den Unterschied zwischen der statischen und der kinetischen Reibung aufklären wollten und dabei fanden, daß bei sehr langsamer, fast an die Ruhe grenzender Bewegung die Reibung zunimmt, wenn die Geschw. abnimmt, wodurch es sich erkläre, daß die statische Reibung größer als die kinetische sei. — Eine Untersuchung von Reynolds (1875) über die rollende Reibung ergab, daß die Fläche, über welche ein Körper rollt, an der Berührungsstelle für einen Augenblick eine seitliche Ausdehnung und eine Einbuchtung erleide; also finde an der Berührungsstelle immer eine gleitende Reibung statt; hieraus erkläre sich die Abnutzung der Eisenbahnschienen auch ohne das Bremsen und der Vortheil der Stahlschienen, sowie die Existenz der rollenden Reibung überhaupt.

$p = 354{,}8^{cm}$. — A. 113. Die Erde wiegt 14 Quadrillionen Pfund; wenn Archimedes seinen festen Punkt auf dem Monde (51800 M.) hätte und von der Sonne (20 Mill. M.) aus die Erde mit einem Hebel aus ihren Angeln zu heben versuchen wollte, welche Kraft müßte er aufwenden? Aufl.: 36000 Trillionen Pfund. — A. 11. Welche Stellung müßte Archimedes haben, wenn er nur eine Kraft von 70^{kg} hätte und den Mond als Stützpunkt benutzen würde? Aufl.: 5180 Quadrillionen Meilen von dem Monde entfernt. — A. 115. An einem Hebel wirken 6 Lasten: 180, 200, 240^{kg} in 40, 60, 70^{cm} Entf. nach oben und 300, 320, 360^{kg} in 50, 80, 90^{cm} Entf. nach unten; wo muß die Kraft von 74^{kg} angebracht werden, um Gleichgewicht zu erzeugen? Aufl.: $74\,p + 180.\,40 + 200.\,60 + 240.\,70 = 300.\,50 + 320.\,80 + 360.\,90$; hieraus $p = 500^{cm}$.

98 **2. Die Rolle** (Archytas aus Tarent 400 v. Chr.?). Eine Rolle ist eine kreisförmige, dicke Scheibe, die um ihre Mittelpunktachse drehbar ist und an ihrem Um-


Fig. 17.

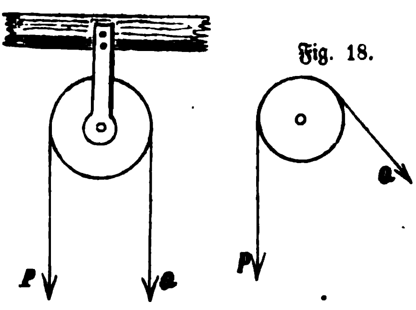


Fig. 18.

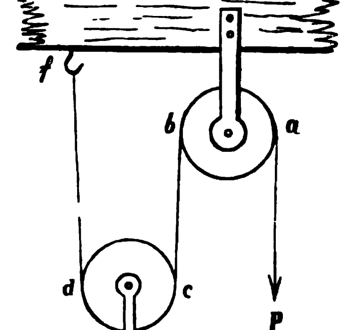


Fig. 19.

fange Schnüre, Riemen oder Ketten aufnehmen kann. Die Achse liegt beiderseits in Lagern; kann sich die Rolle nur um ihre Achse drehen, so nennt man sie feste Rolle (Fig. 17 u. 18); kann sie sich aber außerdem mit der Achse fortbewegen, so ist sie eine bewegliche Rolle.

a. Die feste Rolle. An der festen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft gleich der Last ist.

Beweis. Ziehen wir an dem Kraftseile P (Fig. 17) um x, so ist der Weg der Kraft $= x$, also die Arbeit der Kraft $= Px$. Wenn so das Kraftseil um x verlängert wird, so wird das Lastseil um x verkürzt, die Last Q um x gehoben; folglich ist die Arbeit der Last $= Qx$. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist $Px = Qx$, woraus $P = Q$. Mittels der festen Rolle wird nicht an Kraft gewonnen; sie dient daher zum Heben von nur kleinen Lasten. Eine bedeutendere Verwendung hat sie zur Aenderung der Kraftrichtung (Fig. 18).

b. Die bewegliche Rolle. An der beweglichen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie 1 zu 2.

Beweis. Ziehen wir am Kraftseile aP (Fig. 19) um x, so ist der Weg der Kraft $= x$, also die Arbeit der Kraft $= Px$. Wenn aber das Kraftseil aP um x verlängert wird, so müssen sich die 2 Lastseile cb und df um x, also jedes um $x/2$ verkürzen; die Last wird also um $x/2$ gehoben, der Weg der Last Q ist $x/2$, und demnach die Arbeit der Last $= Q\,.\,x/2$. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist $Px = Q\,.\,x/2$, woraus $P = \frac{1}{2}\,Q$ oder $P : Q = 1 : 2$.

99 **Die Flaschenzüge.** a. Der Differentialflaschenzug, eine Anwendung der beweglichen Rolle (Fig. 20), besteht aus 2 zu einem Stück gegossenen Rollen a und b von verschiedenem Radius, R und r; die Kette geht über die große feste Rolle zu der beweglichen, dann aber nicht an einen festen Punkt, sondern über die kleine feste Rolle und verbindet sich dann mit dem Anfang der Kette zu einer Kette ohne Ende. Beim Heben von Lasten ist am Differential-

Beweis für parallele Kräfte. Um das Princip der virt. Geschwindigkeiten auf den Hebel ab (Fig. 16) anwenden zu können, denken wir uns den Hebel in Bewegung; dann darf für den Fall des Gleichgewichtes an dieser durch Kraft und Last nichts verändert werden, d. h. es muß die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein; die Projection des Kraftweges ist ad, die des Lastweges bf; folglich besteht die Gleichung $P \cdot ad = Q \cdot bf$ oder $P : Q = bf : ad$. Da nun Viereck $ada'c \sim bfb'c$, so ist $bf : ad = cb : ca$; weiter folgt aus der Aehnlichkeit der Dreiecke bcg und ach die Proportion $cb : ca = cg : ch = q : p$. Durch Substitution des letzten Verhältnisses für das erstere in unserer Proportion entsteht $P : Q = q : p$, womit der Satz für parallel wirkende Kräfte bewiesen ist. Die Richtigkeit für nicht parallele Kräfte zu beweisen, soll später eine Aufgabe für den Schüler sein. Den experimentellen Nachweis führt man am einfachsten mit einem in gleiche Theile eingetheilten und an allen Theilpunkten mit Hängringen versehenen zweiarmigen Hebel, so daß man an jeder beliebigen Stelle Lastgewichte aufhängen und diese durch die nach dem Gesetze berechneten und auf der anderen Seite angehängten Kraftgewichte an jeder Stelle balanciren kann.

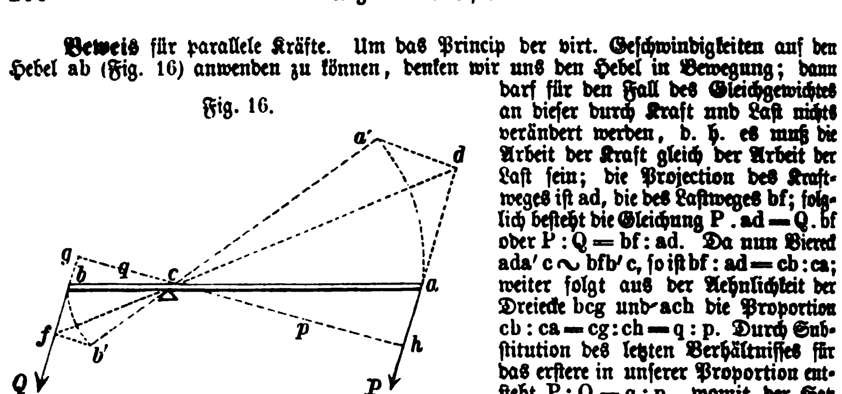


Fig. 16.

Aus der Hebelproportion ergibt sich die Productengleichung $Pp = Qq$; das Product einer Kraft mit ihrem Hebelarme nennt man das statische Moment der Kraft; folglich kann man das Hebelgesetz auch so aussprechen: Am Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn das statische Moment der Kraft gleich ist dem statischen Moment der Last. Wenn auf einen Hebel viele Kräfte wirken, so erhält man durch ähnliche Betrachtungen das allgemeine Gesetz: Am Hebel ist Gleichgewicht, wenn die Summe der statischen Momente aller Kräfte, die den Hebel nach der einen Seite zu drehen streben, gleich ist der Summe der statischen Momente aller Kräfte, welche den Hebel nach der anderen Seite zu drehen streben.

Der Hebel hat die zahlreichsten Anwendungen. Jede Hebe- und Brechstange, die vor der Last unterstützt ist, ist ein zweiarmiger Hebel; wird sie unter die Last geschoben und hinter derselben aufgesetzt, so ist sie ein einarmiger Hebel, wie alle Messer, alle Schreib- und Zeichenwerkzeuge. Zangen und Scheeren bestehen aus 2 zweiarmigen Hebeln, von denen der eine den Stützpunkt für den anderen liefert. Schlüssel und Bohrer haben ihren Stützpunkt in der Achse, der Bart oder die Schneide bilden den Hebelarm der Last, der Griff den der Kraft. Zucker- und Brodscheeren sind einarmige Hebel, ebenso der Arm und andere Glieder des Menschen, bei denen indeß die Kraft mittels eines Muskels ganz nahe am Stützpunkte wirkt und daher dem weiter entfernten Ende des Gliedes eine große Bewegung ertheilt (Geschwindigkeits-Hebel). Thürklinken und Klingelhaken sind Winkelhebel. Alle Arten von Hebeln finden sich an Maschinen; besonders wichtig sind die Leithebel an Locomotiven, die Bremshebel an Hebemaschinen, die Bewegungshebel an Geleisekreuzungen, der Balancier an Dampfmaschinen, der ein gleicharmiger Hebel ist, und die Wagebalken, die bald gleicharmig, bald ungleicharmig sind.

97 **Aufg. 106.** Die Last Q sei $= 1000^{kg}$; die Kraft $P = 50^{kg}$; $q = 0{,}2^{m}$; wie groß muß der Hebelarm p der Kraft sein? Aufl.: $50\,p = 1000 \,.\, 0{,}2$, woraus $p = 4^{m}$. Man kann also mittels des Hebels durch eine geringe Kraft eine große Last heben, wenn nur der Hebelarm der Kraft recht groß ist im Verhältnisse zu demjenigen der Last. — **A. 107.** Ein Mann schiebt eine Stange von 2^{m} Länge unter einen Stein und stützt sie in einem Abstande von 20^{cm} von der Steinmitte; welche Last kann er heben, wenn er einen Druck von 60^{kg} ausüben kann? Aufl.: $Q = 540^{kg}$. — A. 108. $Q = 667^{kg}$; $p = 2{,}3^{m}$, $q = 0{,}3^{m}$; wie groß ist P? Aufl.: $P = 87^{kg}$. — A. 109. $Q = 800^{kg}$; $P = 32^{kg}$; $p = 96^{cm}$, wie groß ist q? Aufl.: $q = 3{,}84^{cm}$. — A. 110. Eine Last von 6 Ctr. soll durch eine Kraft von 60^{kg} mittels eines Hebels von 4^{m} Länge gehoben werden; wo muß der Stützpunkt sein? Aufl.: Die Kraft ist 5mal so klein als die Last, folglich muß ihr Hebelarm 5mal so groß sein; daher $p = 3\frac{1}{3}^{m}$ und $q = \frac{2}{3}^{m}$. — A. 111. $Q = 244^{kg}$, $P = 46^{kg}$; Hebellänge $= 580^{cm}$, wo ist der Stützpunkt? Aufl.: $244\,q = 46\,(580 - q)$; daraus $q = 92^{cm}$; $p = 488^{cm}$. — **A. 112.** $Q = 738{,}3^{kg}$, $P = 58{,}7^{kg}$; Hebellänge $= 383^{cm}$; wo liegt der Stützpunkt? Aufl.: $q = 28{,}2^{cm}$,

p = 354,8cm. — A. 113. Die Erde wiegt 14 Quadrillionen Pfund; wenn Archimedes einen festen Punkt auf dem Monde (51800 M.) hätte und von der Sonne (20 Mill. M.) aus die Erde mit einem Hebel aus ihren Angeln zu heben versuchen wollte, welche Kraft müßte er aufwenden? Aufl.: 36000 Trillionen Pfund. — A. 11. Welche Stellung müßte Archimedes haben, wenn er nur eine Kraft von 70kg hätte und den Mond als Stützpunkt benutzen würde? Aufl.: 5180 Quadrillionen Meilen von dem Monde entfernt. — A. 115. An einem Hebel wirken 6 Lasten: 180, 200, 240kg in 40, 60, 70cm Entf. nach oben und 300, 320, 360kg in 50, 80, 90cm Entf. nach unten; wo muß die Kraft von 74kg angebracht werden, um Gleichgewicht zu erzeugen? Aufl.: 74 p + 180. 40 + 200. 60 + 240. 70 = 300. 50 + 320. 80 + 360. 90; hieraus p = 500cm.

2. Die Rolle (Archytas aus Tarent 400 v. Chr.?). Eine Rolle ist eine kreisförmige, dicke Scheibe, die um ihre Mittelpunktachse drehbar ist und an ihrem Umfange Schnüre, Riemen oder Ketten aufnehmen kann. Die Achse liegt beiderseits in Lagern; kann sich die Rolle nur um ihre Achse drehen, so nennt man sie feste Rolle (Fig. 17 u. 18); kann sie sich aber außerdem mit der Achse fortbewegen, so ist sie eine bewegliche Rolle. 98

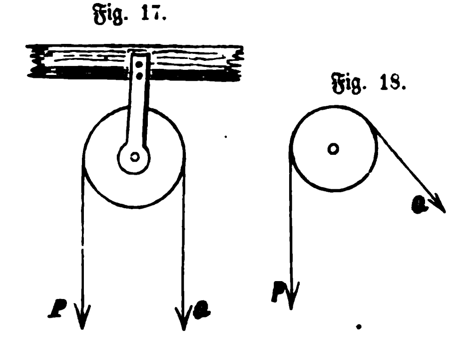


Fig. 17. Fig. 18.

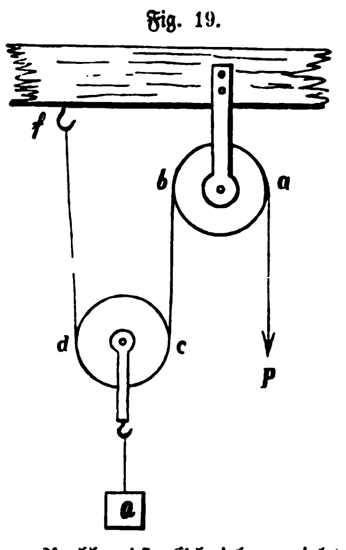


Fig. 19.

a. Die feste Rolle. An der festen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft gleich der Last ist.

Beweis. Ziehen wir an dem Kraftseile P (Fig. 17) um x, so ist der Weg der Kraft = x, also die Arbeit der Kraft = Px. Wenn so das Kraftseil um x verlängert wird, so wird das Lastseil um x verkürzt, die Last Q um x gehoben; folglich ist die Arbeit der Last = Qx. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist Px = Qx, woraus P = Q. Mittels der festen Rolle wird nicht an Kraft gewonnen; sie dient daher zum Heben von nur kleinen Lasten. Eine bedeutendere Verwendung hat sie zur Aenderung der Kraftrichtung (Fig. 18).

b. Die bewegliche Rolle. An der beweglichen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie 1 zu 2.

Beweis. Ziehen wir am Kraftseile aP (Fig. 19) um x, so ist der Weg der Kraft = x, also die Arbeit der Kraft = Px. Wenn aber das Kraftseil aP um x verlängert wird, so müssen sich die 2 Lastseile cb und df um x, also jedes um x/2 verkürzen; die Last wird also um x/2 gehoben, der Weg der Last Q ist x/2, und demnach die Arbeit der Last = Q . x/2. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist Px = Q . x/2, woraus P = 1/2 Q oder P : Q = 1 : 2.

Die Flaschenzüge. a. Der Differentialflaschenzug, eine Anwendung der beweglichen Rolle (Fig. 20), besteht aus 2 zu einem Stück gegossenen Rollen a und b von verschiedenem Radius, R und r; die Kette geht über die große feste Rolle zu der beweglichen, dann aber nicht an einen festen Punkt, sondern über die kleine feste Rolle und verbindet sich dann mit dem Anfang der Kette zu einer Kette ohne Ende. Beim Heben von Lasten ist am Differential- 99

flaschenzuge Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie die Differenz der Radien der beiden festen Rollen zum doppelten Radius der großen festen Rolle.

Fig. 20.

Beweis. Ziehen wir links soviel an der Kraftkette, daß sich die feste Rolle halb umdreht, so ist der Kraftweg πR, also die Arbeit der Kraft πRP. Ginge nun die Lastkette de nach einem festen Punkte, so würde sich die Lastrolle um $\pi/_2\,R$ heben. Weil jene Kette aber an die kleine Rolle b geht, die sich dann auch halb umdreht, so senkt sich der linke Berührungspunkt dieser Kette um πr, also verlängert sich jeder der beiden Kettentheile do und gf um $\pi/_2\,r$, und die Lastrolle senkt sich um $\pi/_2\,r$. Folglich beträgt die Resthebung der Last $\pi/_2\,(R-r)$ und ihre Arbeit $Q\pi/_2\,(R-r)$. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist $\pi PR = Q\pi/_2\,(R-r)$, woraus $P : Q = R - r : 2R$.

Fig. 21.

b. Der gewöhnliche Flaschenzug (Fig. 21) besteht aus einem festen Gehäuse oder Flasche und einer beweglichen Flasche, welche gleich viele, je 2 gleiche Rollen enthalten, die durch ein einziges, von einer festen immer zu der gleichen beweglichen Rolle gehendes Seil verbunden sind. An dem Flaschenzuge findet Gleichgewicht statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie 1 zur Anzahl der Lastseile.

Beweis. Ziehen wir wieder an dem Kraftseile um x, so ist die Arbeit der Kraft $= Px$. Wenn sich nun das Kraftseil um x verlängert, so müssen sich alle n Lastseile zusammen um x verkürzen; daher wird jedes Lastseil, da sie gespannt bleiben und sich sonach um gleichviel verkürzen müssen, um $^1/_n\,.\,x$ verkürzt; der Weg der Last ist $^1/_n\,.\,x$ und die Arbeit der Last $^1/_n\,.\,xQ$. Durch die allgemeine Gleichgewichtsbedingung entsteht daher die Gleichung $Px = {}^1/_n\,.\,Qx$, woraus $P : Q = 1 : n$.

Fig. 22.

c. Der Potenzenflaschenzug oder Rollenzug (Fig. 22) besteht aus einer festen und n beweglichen Rollen, von denen die unterste die Last trägt. Am Potenzenflaschenzuge ist Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie 1 zur sovielten Potenz von 2, als bewegliche Rollen vorhanden sind.

Der Beweis ist durch wiederholte Anwendung des bei der beweglichen Rolle eingeschlagenen Verfahrens zu führen; die Arbeit der Kraft ist Px, die Arbeit der Last $Q\,(x/2\,.\,2\,.\,2\,.\,2\,.\,.\,.\,.\,.) = Q\,(x/2^n)$, woraus $P : P = 1 : 2^n$.

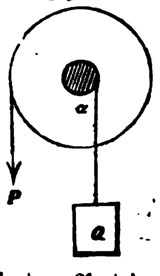
100

Aufg. 116. Die Gesetze für die feste und bewegliche Rolle sind mit Benutzung des Hebelgesetzes nachzuweisen. Andeutung: Die feste Rolle ist ein Hebel, dessen Stützpunkt in der Achse liegt; bei der beweglichen Rolle ist der Stützpunkt in dem Berührungspunkte d der Rolle mit dem Aufhängseil df (Fig. 19). — A. 117. Das Gesetz des Differentialflaschenzugs für das Herablassen der Last, wobei am rechten losen Kettentheil (Fig. 20) gezogen wird, zu finden? Aufl.: $P : Q = r - R : 2r$. —

A. 118. Die Kraft zum Heben und Herablassen der Last Q zu finden für den Fall, daß der Durchmesser der kleineren Rolle $^3/_4$ von dem der größeren sei? Aufl.: $P = {}^1/_6\,Q$ und $P = {}^1/_8\,Q$. — A. 119. Aus dem Hebelgesetze zu schließen, daß an dem Differentialflaschenzuge (Fig. 20) beim Senken mehr Kraft zum Gleichgewichthalten nöthig ist als beim Heben. Andeutung: der Unterschied der beiden festen Rollen a und b. — A. 120. Welcher Theil der Last ist an dem in Fig. 22 abgebildeten Rollenzuge zum Gleichgewichte nöthig? Aufl.: Der 16te Theil. — A. 121. Warum wird trotz dieser großen Krafterſparniß derselbe nur selten angewendet? — A. 122. Bei genauer Berechnung muß für den Rollenzug auch das Gewicht der Rollen berücksichtigt werden. Der Rollenzug enthalte 3 bewegliche Rollen von 10^{kg}, 8^{kg} und 6^{kg} Gewicht. Die Last sei $= 300^{kg}$. Wie groß muß die Kraft sein? Aufl.: $P = ([(300 + 10)\,{}^1/_2 + 8]\,.\,{}^1/_2 + 6\,.\,{}^1/_2 = 43\,{}^3/_4{}^{kg}$. — A. 123. Wie groß müßte die Zahl der beweglichen Rollen (ohne Rücksicht auf das Gewicht) sein, um mit einer Kraft von 20^{kg} eine Last von 640^{kg} zu heben? Aufl.: $20 : 640 = 1 : 2^n$; hieraus $n = \log 32 : \log 2 = 5$. — A. 124. Wie groß ist die Kraft P, welche einen Rollenzug von n gleichen beweglichen Rollen mit dem Gewichte G und die Last Q im Gleichgewichte hält? Aufl.: $P = \frac{1}{2^n}(Q + G) + \frac{1}{2^{n-1}}\,G + \frac{1}{2^{n-2}}\,G + \ldots \frac{1}{2}\,G = \frac{Q}{2^n} + \frac{2^n - 1}{2^n}\,G = \frac{Q}{2^n} + \left(1 - \frac{1}{2^n}\right)\,G = \frac{Q - G}{2^n} + G.$ Bei Ableitung dieser Formel muß man die Summenformel für eine geometrische Reihe anwenden. — A. 125. Ein Rollenzug enthält 10 bewegliche Rollen vom Gewichte von 1^{kg}, welche Kraft ist nöthig, um 1000^{kg} zu tragen? Aufl.: $P = 1\,{}^{999}/_{1024}{}^{kg}$.

101 **3. Das Rad an der Welle.** Die Last wirkt an dem Umfange einer cylindrischen Walze, während die Kraft an dem Umfange eines mit der Walze unauflöslich verbundenen Kreises wirkt. Dieser Kreis kann ein Rad sein, dessen Arme oder Zähne von der Kraft gezogen oder gedrückt werden, wie beim Spillenrade oder dem Räderwerke; er kann auch der Weg einer Stange sein, welche durch die Welle gesteckt ist, wie bei Erdwinden und Haspel, oder welche an das eine Ende der Welle befestigt ist und dann Kurbel genannt wird. Es kann auch ein hohles Rad sein, in welchem auf dem Umfange Menschen oder Thiere gehen. Die Welle kann auch aufrecht stehen und mit einem langen Arme versehen sein, an dessen Ende ein Mensch drückt oder ein Pferd angeschirrt ist, wie in den alten Oelmühlen u. dergl. — Beim Rad an der Welle ist Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Radius der Welle zum Radius des Rades.

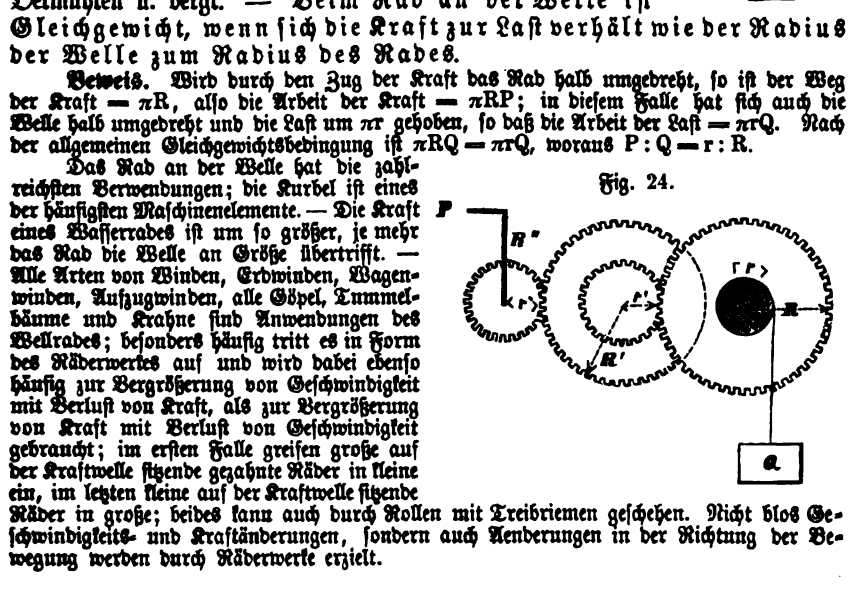
Fig. 23.



Beweis. Wird durch den Zug der Kraft das Rad halb umgedreht, so ist der Weg der Kraft $= \pi R$, also die Arbeit der Kraft $= \pi RP$; in diesem Falle hat sich auch die Welle halb umgedreht und die Last um πr gehoben, so daß die Arbeit der Last $= \pi rQ$. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist $\pi RQ = \pi rQ$, woraus $P : Q = r : R$.

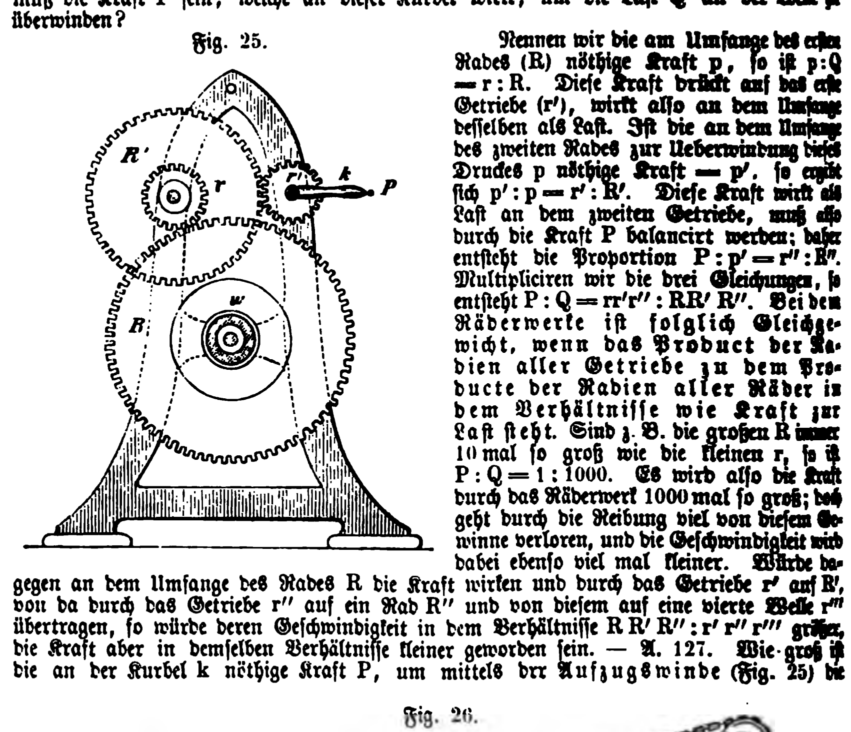
Das Rad an der Welle hat die zahlreichsten Verwendungen; die Kurbel ist eines der häufigsten Maschinenelemente. — Die Kraft eines Wasserrades ist um so größer, je mehr das Rad die Welle an Größe übertrifft. — Alle Arten von Winden, Erdwinden, Wagenwinden, Aufzugwinden, alle Göpel, Tummelbäume und Krahne sind Anwendungen des Wellrades; besonders häufig tritt es in Form des Räderwerkes auf und wird dabei ebenso häufig zur Vergrößerung von Geschwindigkeit mit Verlust von Kraft, als zur Vergrößerung von Kraft mit Verlust von Geschwindigkeit gebraucht; im ersten Falle greifen große auf der Kraftwelle sitzende gezahnte Räder in kleine ein, im letzten kleine auf der Kraftwelle sitzende Räder in große; beides kann auch durch Rollen mit Treibriemen geschehen. Nicht blos Geschwindigkeits- und Kraftänderungen, sondern auch Aenderungen in der Richtung der Bewegung werden durch Räderwerke erzielt.

Fig. 24.



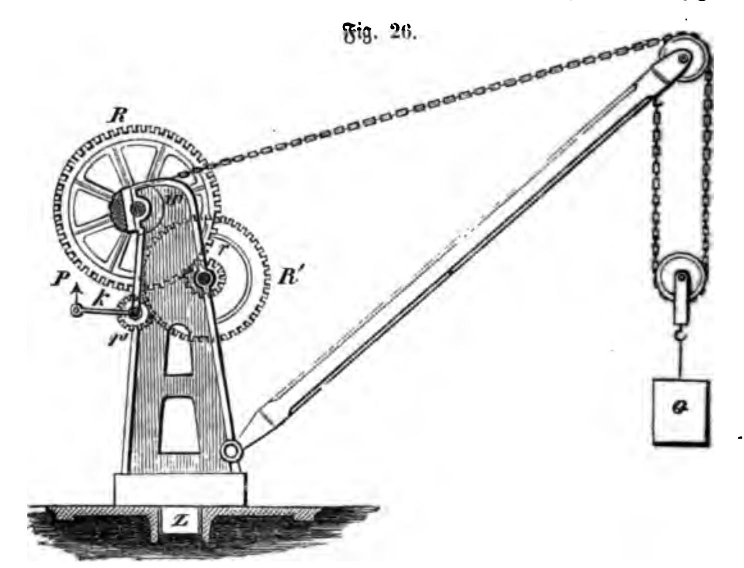
102 **Aufg.** 126. Auf einer Lastwelle (Fig. 24) sitzt ein Zahnrad fest, das in ein anderes kleines Zahnrädchen, Getriebe genannt, eingreift; auf der Achse desselben sitzt ein zweites Zahnrad, das abermals in ein Getriebe greift, auf welchem eine Kurbel sitzt. Wie groß muß die Kraft P sein, welche an dieser Kurbel wirkt, um die Last Q an der Welle zu überwinden?

Fig. 25.



Nennen wir die am Umfange des ersten Rades (R) nöthige Kraft p, so ist p:Q = r:R. Diese Kraft drückt auf das erste Getriebe (r'), wirkt also an dem Umfange desselben als Last. Ist die an dem Umfange des zweiten Rades zur Ueberwindung dieses Druckes p nöthige Kraft = p', so ergibt sich p' : p = r' : R'. Diese Kraft wirkt als Last an dem zweiten Getriebe, muß also durch die Kraft P balancirt werden; daher entsteht die Proportion P : p' = r'' : R''. Multipliciren wir die drei Gleichungen, so entsteht P : Q = rr'r'' : RR' R''. Bei dem Räderwerke ist folglich Gleichgewicht, wenn das Product der Radien aller Getriebe zu dem Producte der Radien aller Räder in dem Verhältnisse wie Kraft zur Last steht. Sind z. B. die großen R immer 10 mal so groß wie die kleinen r, so ist P : Q = 1 : 1000. Es wird also die Kraft durch das Räderwerk 1000 mal so groß; doch geht durch die Reibung viel von diesem Gewinne verloren, und die Geschwindigkeit wird dabei ebenso viel mal kleiner. Würde dagegen an dem Umfange des Rades R die Kraft wirken und durch das Getriebe r' auf R', von da durch das Getriebe r'' auf ein Rad R'' und von diesem auf eine vierte Welle r''' übertragen, so würde deren Geschwindigkeit in dem Verhältnisse R R' R'' : r' r'' r''' größer, die Kraft aber in demselben Verhältnisse kleiner geworden sein. — A. 127. Wie groß ist die an der Kurbel k nöthige Kraft P, um mittels der Aufzugswinde (Fig. 25) die

Fig. 26.



Last Q zu heben, wenn zweifache Räderübersetzung stattfindet, und die Buchstaben an den Rädern zugleich die Radien derselben bezeichnen. Die Last Q hängt an der Welle w.

Aufl.: $P = Q \cdot \frac{r'}{k} \cdot \frac{r}{R'} \cdot \frac{w}{R} = Q \cdot \frac{w}{k} \cdot \frac{r'}{R'} \cdot \frac{r}{R}$. Wenn umgekehrt z. B. $w = 15^{cm}$, $k = 45^{cm}$ und die Uebersetzungszahlen $R : r = 7$ und $R' : r' = 5$ sind, so kann durch eine Kraft von 20^{kg}, die ein Mann leicht aufwenden kann, eine Last gehoben werden von 2100^{kg}. — A. 128. An dem **Krahn** (Fig. 26) wirkt die Kraft eines Mannes drehend an der Kurbel k mittels des Getriebes r' auf das Rad R', auf dessen Achse das Getriebe r sitzt und das große Rad R bewegt, welches mit der Welle w einerlei Achse hat. Eine an der Welle befestigte Kette geht über eine feste Rolle um eine bewegliche Rolle, an welcher die Last Q hängt. Wie groß muß die Kraft P, abgesehen von den Hindernissen sein, um Q zu heben, wenn die Buchstaben zugleich immer die Radien bezeichnen?

Aufl.: $P = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{k} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{r'}{R'} \cdot Q$. Der ganze Krahn läßt sich um den Zapfen s drehen; daher wird der Krahn zum Auf- und Abladen großer Lasten an Flüssen, Eisenbahnen, Bestättereien gebraucht. — A. 129. Wie groß ist die zur Ueberwindung der Zapfenreibung der festen Rolle nöthige Kraft, wenn die Radien des Zapfens und der Rolle r und R sind? Aufl.: Die Reibung ist $= 2 \,.\, \frac{1}{12} (2Q + G)$, wenn G das Gewicht der Rolle. Am Umfange der Rolle muß die Kraft sein $P = \frac{1}{6} (2Q + G) \,.\, r / R$. — A. 130. Wie groß ist die am Umfange des Rades nöthige Kraft zur Ueberwindung der Zapfenreibung des Rades an der Welle? Aufl.: Die Reibung selbst ist $= 2 \,.\, \frac{1}{12} (P + Q + G)$; die Kraft am Umfange des Rades $= \frac{1}{6} (P + Q + G) \,.\, r / R$. — A. 131. Nach Redtenbacher ist die Reibung der Zahnräder $= Df\pi (1/N + 1/n)$, worin N und n die Zahl der Zähne der beiden Räder bedeuten; wenn nun in dem Räderwerke (Fig. 24) das Rad R die Zahnzahl n hat, welches ist dann der an der Kurbel nöthige Kraftbetrag zur Ueberwindung der Reibung an diesem Räderwerke, wobei wir indeß von dem durch diese Kraft erzeugten Drucke absehen wollen? Aufl.: Der Druck zwischen den Zähnen von R und r' ist $= Qr / R$ und zwischen den Zähnen von R' und r'' ist dieser Druck $= Qrr' / RR'$; daher ist der auf die Kurbel reducirte Betrag der Reibung $= \frac{Qr}{R} \,.\, f\pi \left(\frac{1}{n} + \frac{R}{r'} \cdot \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{r'r''}{R'R''} + \frac{Qrr'}{RR'} \cdot f\pi \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{R}{r'} \cdot \frac{r'}{R'} + \frac{1}{n} \cdot \frac{R}{R'} \cdot \frac{R'}{r''}\right) \frac{r''}{R''} = \frac{Qrr'r''}{R'R''} \cdot \frac{f\pi}{n} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''}\right)$.

4. Die schiefe Ebene. Unter einer schiefen Ebene verstehen wir eine gegen den Horizont geneigte Ebene, auf welcher eine Last liegt. Es soll die Größe der Kraft gefunden werden, welche das Herabrollen der Last verhindert, und welche zum Heben der Last in jedem Augenblicke der Bewegung verwendet werden muß, wobei wir von den Hindernissen der Bewegung, wie Reibung und Widerstand der Luft absehen. Die Richtung der Kraft ist eine beliebige; wir fassen nur die zwei Fälle ins Auge, wo die Kraft parallel zur schiefen Ebene, und wo sie wagrecht wirkt. Die Linie ab (Fig. 27) nennt man die Länge, bc die Höhe und ac die Basis der schiefen Ebene. 103

Fig. 27.

a. Für den Fall der parallelen Wirkung ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Länge derselben.

Beweis. Ziehen wir die Last Q mittels der parallelen Kraft P von dem Fuße a der schiefen Ebene bis zum Gipfel b derselben, so hat die Kraft in ihrer eigenen Richtung den Weg $ab = l$ zurückgelegt, wodurch ihre Arbeit $= Pl$ wird; die Last Q hat sich dann in ihrer eigenen lothrechten Richtung um die Höhe $bc = h$ gehoben, also die Arbeit Qh verzehrt. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist demnach $Pl = Qh$, woraus $P : Q = h : l$. Hieraus folgt auch, daß $P = Q \,.\, h / l = Q \sin \alpha$.

b. Für den Fall der wagrechten Wirkung ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis derselben.

Beweis. Ziehen wir die Last Q mittels der wagrechten Kraft P von dem Fuße der schiefen Ebene bis zum Gipfel derselben, so hat die Kraft in ihrer eigenen Richtung

den Weg ac = b zurückgelegt und so die Arbeit Pb vollbracht, während die von der Last Q consumirte Arbeit = Qh ist; hieraus ergibt sich nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung, daß Pb = Qh ist, woraus P : Q = h : b. Hieraus folgt auch, daß P = Qh / b = Q tang α.

104 Die beiden Sätze über die schiefe Ebene kann man experimentell nachweisen mittels eines Apparates mit einer drehbaren schiefen Ebene, welche man in die verschiedensten Stellungen bringen und in denselben durch eine Schraube befestigen kann; auf die schiefe Ebene wird ein Messingcylinder gelegt, von dessen Rähmchen eine Schnur über eine Rolle zu einer Wagschale geht. Die Gewichte, welche den Messingcylinder balanciren sollen, werden nach den beiden Sätzen im voraus berechnet und müssen dann das Gleichgewicht herstellen. — Im Leben wird eine directe Anwendung der schiefen Ebene meist nach der ersten Wirkungsart gemacht; man befördert auf ansteigenden Straßen und Eisenbahnen Lasten in die Höhe mit verhältnißmäßig kleinen Kräften; denn, abgesehen von der Reibung, braucht die Kraft nur einen durch den Sinus des Neigungswinkels bestimmten Bruchtheil der Last zu betragen; macht man daher den Neigungswinkel oder die Steigung sehr klein, indem man die Straßen in Windungen an Bergen hinaufführt, so kann man große Lasten auf denselben befördern. Für den Winkel Null ergibt sich P auch gleich Null; dies ist auch richtig, weil eine einmal in wagrechte Bewegung gesetzte Masse, abgesehen von den Hindernissen, nach dem Gesetze der Trägheit ins Unendliche in derselben Richtung fortgehen würde. Die Hindernisse betragen aber auf gewöhnlichen Straßen $^1/_{15}$—$^1/_{30}$, auf Eisenbahnen $^1/_{180}$—$^1/_{200}$ der Last, und dieser Betrag muß demnach auf einer wagrechten Straße von der Kraft fortwährend überwunden werden, wenn die Masse einmal in Bewegung ist. Dieser Betrag ist zwar bei der schiefen Ebene etwas kleiner, aber vergrößert doch immer die nöthige Kraft beim Hinaufbefördern; beim Niedergleiten auf der schiefen Ebene wird die das Herabrollen hindernde Kraft durch den Betrag der Hindernisse verkleinert. Man benutzt daher die schiefe Ebene als Schleife beim Abladen, beim Herablassen von Lasten in Keller u. s. w.

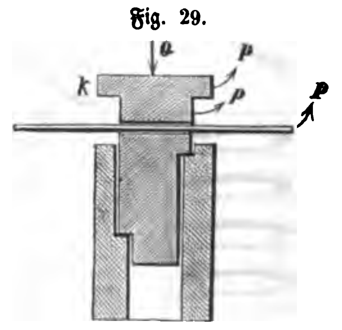
105 Aufg. 132. Auf einer schiefen, glatten Fläche liegt eine glatte Kugel von 1000^{kg} Gewicht; welche Kraft muß an einem parallelen Seile wirken, wenn die schiefe Ebene auf einer Länge von 10^m eine Höhe von 50^{cm}, also eine Steigung von 1 auf 20 hat, um die Last vor dem Herabrollen zu schützen oder die in Bewegung gesetzte Masse weiter zu bewegen? Aufl.: P : 1000 = $^1/_2$: 10 = 1 : 20, woraus P = 50^{kg}. — A. 133. Wie viel % dürfte die Steigung blos betragen, wenn ein Mann, der nur mit einer Kraft von 20^{kg} dauernd ziehen könnte, die Last fortbewegen sollte? Aufl.: 20 : 1000 = h : 100, woraus h = 2 auf 100 oder 2%. — A. 134. Mit welcher Kraft muß auf einer Straße, wo die Hindernisse $^1/_{30}$ betragen und die Steigung 5% oder 1 : 20 ausmacht, an einem Wagen von 10 Ctr. Gewicht gezogen werden, um ihn vor dem Hinabrollen zu schützen? Aufl.: P = ($^1/_{20}$—$^1/_{30}$) . 500 = $8^1/_3{}^{kg}$. — A. 135. Welches Gewicht darf ein Wagen haben, der auf einer Straße von 1 : 20 Steigung, und wo die Hindernisse $^1/_{40}$ der Last betragen, mit einer Geschwindigkeit von $^1/_2{}^m$ durch ein Pferd gezogen werden soll? Aufl.: Sei x das gesuchte Gewicht, so ist die Kraft = $^1/_{20}$x + $^1/_{40}$x; daher der Effect des Pferdes = $^{3x}/_{40}$. $^1/_2{}^{mk}$. Da nun eine Pferdekraft = 75^{mk} ist, so entsteht die Gleichung $^{3x}/_{80}$ = 75, woraus x = 2000^{kg}. — A. 136. Auf der Semering-Bahn, wo die Steigung 1 : 35 ist und die Hindernisse $^1/_{200}$ der Last betragen, soll ein Zug von 91 Tonnen à 1000^{kg} mit einer Geschwindigkeit von 6^m bergan steigen; wie groß müßte der Effect der Locomotive sein? Aufl.: = 91 000 ($^1/_{35}$ + $^1/_{200}$) 6 = 18330^{mk} = $244^2/_5$ e.

Fig. 28.

106 **5. Die Schraube.** Archytas 400 v. Chr.). Die Schraube ist eine schiefe Ebene, welche um einen Cylinder gewunden ist. Schneidet man aus einer dicken Kautschukplatte eine schiefe Ebene, wie abcdef in Fig. 28, deren Basis ab gleich dem Umfange der Grundfläche eines Cylinders ist, und windet dann dieselbe um den Cylinder, so nimmt sie die Lage a'b'c'd'e'f' an; das obere Ende c'd' derselben erscheint dann senkrecht über dem Anfange a'e', die eigentliche schiefe Ebene acde selbst

bildet dann ein vollständiges Gewinde oder einen Schraubengang, die Höhe bc der schiefen Ebene bildet die Gewindhöhe oder Höhe eines Schraubenganges b'c', und die Basis der schiefen Ebene erscheint als Umfang des Schraubenbolzens oder der Schraubenspindel, wie man den umwundenen Cylinder nennt. Bringt man nun in das Innere eines hohlen Cylinders, dessen lichte Weite gleich dem Durchmesser der Spindel ist, eine ganz gleiche gewundene schiefe Ebene, eine Einrichtung, die man Schraubenmutter nennt, und setzt dann die Spindel mit ihrer Windung auf diejenige der Mutter, wie es Fig. 29 im Durchschnitte zeigt, so wird die Spindel mit ihrem ganzen Gewichte und einer noch etwa auf derselben liegenden Last Q auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter drücken, und würde drehend hinabgleiten, wenn keine Reibung stattfände. Sehen wir von derselben ab, so können wir doch das Hinabgleiten verhüten oder auch die schon in steigende Drehung versetzte Spindel weiter drehen, wenn wir am Umfange derselben eine wagrechte Kraft P anbringen. Alsdann wirken Last und Kraft gerade so auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter wie in dem zweiten Falle der Lehre von der schiefen Ebene. Es findet daher nach dem dort gefundenen Satze Gleichgewicht bei der Schraube statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis derselben, d. h. wie die Gewindhöhe zum Umfange der Spindel. Gewöhnlich wirkt nun die Kraft P nicht am Umfange der Spindel, sondern am Umfange eines Schraubenkopfes k von größerem Durchmesser, oder am Ende einer Kurbel oder einer durch den Bolzen gesteckten Hebelstange; dadurch wird der Weg der Kraft, also auch die zu überwindende Last um so viel größer, als der Umfang des von der Kraft beschriebenen Kreises den Umfang der Spindel übertrifft. Es hat daher das Gesetz des Gleichgewichtes für die Schraube allgemeiner folgende Fassung: *Bei der Schraube verhält sich im Falle des Gleichgewichtes die Kraft zur Last wie die Gewindhöhe zum Umfange des Kraftkreises.* Aus diesem Gesetze ergibt sich eine Folgerung, auf welcher die meisten der so zahlreichen Anwendungen der Schraube beruhen: Wenn man nämlich durch eine drehend wirkende Kraft eine Last überwinden kann, welche in der Richtung der Spindelachse wirkt, so muß nach dem fünften Axiom die Kraft in dieser Richtung einen der Last gleichen und entgegengesetzten Druck ausüben. Man kann demnach durch Umdrehen einer Schraube einen Druck in der Richtung der Spindelachse erzeugen; die Richtung dieses Druckes kann man umkehren, indem man die Spindel in entgegengesetzter Richtung dreht.

Fig. 29.

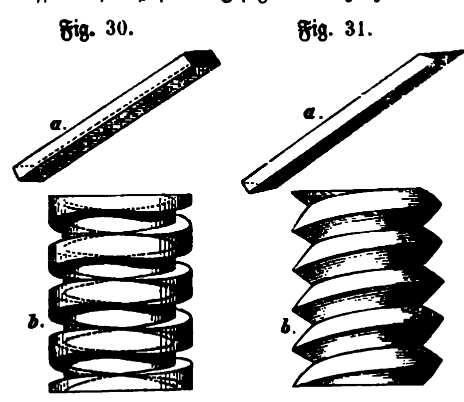


Bei den practisch verwendeten Schrauben ist es nicht eine einzige schiefe Ebene, welche an der Grundfläche der Spindel ihre Windungen beginnt, sondern mehrere in gleichen Abständen; außerdem besitzen die schiefen Ebenen eine solche Länge, daß sich ihre Umwindungen öfter wiederholen; endlich sind eigentlich nicht schiefe Ebenen mit ihrer ganzen massiven Unterlage, sondern nur die der Länge nächsten Streifen um den Kern der Spindel gewunden.

Sind diese Streifen vierkantig rechteckig (Fig. 30 a), so entstehen Schrauben mit flachem Gewinde (Fig. 30 b); sind dieselben aber dreikantig (Fig. 31 a), so entstehen Schrauben mit scharfem Gewinde (Fig. 31 b). Die Gewinde liegen unmittelbar an einander und bedecken die ganze Oberfläche des Bolzens und ebenso die ganze Innenfläche der Mutter. Dadurch wird die Wirkung der Schraube ununterbrochen, ohne daß hierdurch die Reibung vergrößert wird; denn die Reibung ist ja von der Größe der Berührungsflächen unabhängig. Indessen ist dieselbe hier doch sehr groß, weil sie eben gleitende Reibung ist. Gerade von dieser großen Reibung aber macht man die vielfältigste Anwendung; denn diese kann schon für sich allein an einer Maschine eine Last im Gleichgewichte halten; sie macht aber auch

die Schrauben zur Befestigung geeignet. Wenn man z. B. eine Schraube mit scharfem Gewinde in Holz hineindreht, so übt dieselbe einen so starken Druck in der Richtung der Achse aus, daß sie die Festigkeit des Holzes überwinden kann; ebenso groß ist aber auch der Widerstand, der Gegendruck des Holzes.

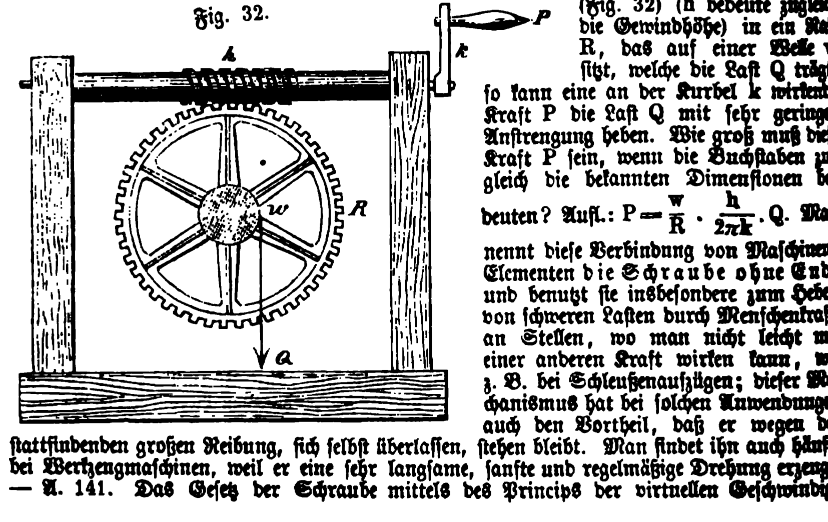
Fig. 30. Fig. 31.



Weil demnach die Windungen und das Holz sich fest gegen einander pressen, so entsteht eine so große Reibung, daß die Windungen im Inneren des Holzes fest bleiben, und nur dann zurückkehren, wenn der Gegendruck des Holzes durch eine entgegengesetzte Drehung der Schraube, wodurch sich nämlich der Achsendruck umkehrt, unterstützt wird. Auf dem Drucke in der Richtung der Achse beruht auch die Verwendung der Schraube zu Bohrern, Korkziehern, zur Archimedischen Schnecke (als Pumpe verwendet), zu den außerordentlich zahlreichen Arten von Schraubenpressen, zur Schraubenwinde, besonders aber ihre so wichtige Verwendung zum Fortbewegen der Schiffe als Schiffschraube (erfunden von Ressel 1827 in Triest), an Stelle der Schaufelräder, wodurch nicht nur der Wellenschlag bedeutend vermindert, sondern auch dem wichtigsten Theile des Schiffes eine versteckte Stelle angewiesen wird. — Sind die Windungen der Schraubenspindel genau einander gleich und gleichmäßig geschnitten, so wird für jede Umdrehung die Spindel genau um gleichviel fortbewegt und ebenso für gleiche Bruchtheile einer Umdrehung um gleiche, kleine Strecken fortgeschoben. Die Spindel wird fortbewegt, wenn die Mutter festsitzt, die Mutter dagegen, wenn die Spindel festsitzt. Die letzte Einrichtung ist an vielen Arbeits- oder Werkzeugmaschinen, z. B. zur Verschiebung des Supports an Drehbänken gebräuchlich, die erste an vielen physikalischen Meßapparaten. Sind die Windungen sehr fein, so können mit einer solchen Schraube sehr kleine Bewegungen gemacht und durch die dabei vollbrachte Drehung des Schraubenkopfes dennoch genau gemessen werden; diese Einrichtung nennt man Mikrometerschraube.

107 Aufg. 137. An welchem Hebelarme muß ein Mann mit einer Kraft von 40^{kg} bei einer Schraube von 2^{cm} Gewindhöhe wirken, um eine Last von 60 Ctr. zu heben? Aufl.: $23{,}9^{cm}$. — A. 138. Welche Gewindhöhe muß eine Schraube haben, damit durch eine Kraft von 40^{kg} an einer Kurbel von 50^{cm} Länge eine Last von 200 Ctr. gehoben werden könne? Aufl.: $1{,}2566^{cm}$. — A. 139. Der Kopf einer Mikrometerschraube sei in 360^{0} getheilt und müsse 20mal gedreht werden, um die Schraube um 1^{cm} fortzubewegen; welche Bewegung erzeugt eine Drehung von 13^{0}? Aufl.: $0{,}01806^{mm}$. — A. 140. Greift eine Schraube h (Fig. 32) (h bedeute zugleich die Gewindhöhe) in ein Rad R, das auf einer Welle w sitzt, welche die Last Q trägt, so kann eine an der Kurbel k wirkende Kraft P die Last Q mit sehr geringer Anstrengung heben. Wie groß muß diese Kraft P sein, wenn die Buchstaben zugleich die bekannten Dimensionen bedeuten? Aufl.: $P = \frac{w}{R} \cdot \frac{h}{2\pi k} \cdot Q$. Man nennt diese Verbindung von Maschinen-Elementen die Schraube ohne Ende und benutzt sie insbesondere zum Heben von schweren Lasten durch Menschenkraft, an Stellen, wo man nicht leicht mit einer anderen Kraft wirken kann, wie z. B. bei Schleußenaufzügen; dieser Mechanismus hat bei solchen Anwendungen auch den Vortheil, daß er wegen der stattfindenden großen Reibung, sich selbst überlassen, stehen bleibt. Man findet ihn auch häufig bei Werkzeugmaschinen, weil er eine sehr langsame, sanfte und regelmäßige Drehung erzeugt. — A. 141. Das Gesetz der Schraube mittels des Princips der virtuellen Geschwindig-

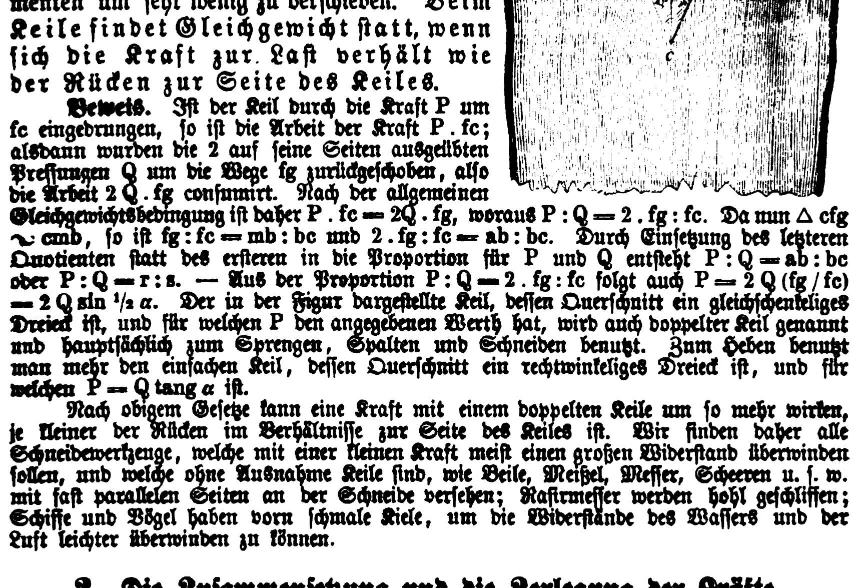
Fig. 32.



keiten zu beweisen. Anb.: Bei einer Umdrehung legt die Last den Weg der Gewindhöhe zurück, die Kraft aber ihren ganzen Kreis.

108 **6. Der Keil.** Ein Keil ist ein dreiseitig prismatischer Körper, dessen einer Kantenwinkel ein sehr spitzer ist. Die dieser scharfen Kante gegenüber liegende Fläche des Keiles nennt man den Rücken, die anliegenden Flächen die Seiten desselben; oft bezeichnet man mit diesen Namen nicht die Flächen selbst, sondern ihre Schnitte ab und ac oder bc (Fig. 33) durch die Ebene. Den Keil wendet man an, indem man ihn mit der scharfen Kante in feste Holz- oder Steinmassen treibt, um dieselben zu sprengen oder zwischen andere Holzstücke in der Keilpresse, um zwischen diesen Stücken liegende Stoffe auszupressen (Oelmühlen); man schiebt ihn unter Lasten, um dieselben zu heben; man gebraucht ihn als Meßkeil, um Theile von Meßinstrumenten um sehr wenig zu verschieben. Beim Keile findet Gleichgewicht statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Rücken zur Seite des Keiles.

Fig. 33.



Beweis. Ist der Keil durch die Kraft P um fc eingedrungen, so ist die Arbeit der Kraft P . fc; alsdann wurden die 2 auf seine Seiten ausgeübten Pressungen Q um die Wege fg zurückgeschoben, also die Arbeit 2 Q . fg consumirt. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist daher $P . fc = 2Q . fg$, woraus $P : Q = 2 . fg : fc$. Da nun $\triangle cfg \sim cmb$, so ist $fg : fc = mb : bc$ und $2 . fg : fc = ab : bc$. Durch Einsetzung des letzteren Quotienten statt des ersteren in die Proportion für P und Q entsteht $P : Q = ab : bc$ oder $P : Q = r : s$. — Aus der Proportion $P : Q = 2 . fg : fc$ folgt auch $P = 2 Q (fg / fc) = 2 Q \sin {}^1/_2 \alpha$. Der in der Figur dargestellte Keil, dessen Querschnitt ein gleichschenkeliges Dreieck ist, und für welchen P den angegebenen Werth hat, wird auch doppelter Keil genannt und hauptsächlich zum Sprengen, Spalten und Schneiden benutzt. Zum Heben benutzt man mehr den einfachen Keil, dessen Querschnitt ein rechtwinkeliges Dreieck ist, und für welchen $P = Q \operatorname{tang} \alpha$ ist.

Nach obigem Gesetze kann eine Kraft mit einem doppelten Keile um so mehr wirken, je kleiner der Rücken im Verhältnisse zur Seite des Keiles ist. Wir finden daher alle Schneidewerkzeuge, welche mit einer kleinen Kraft meist einen großen Widerstand überwinden sollen, und welche ohne Ausnahme Keile sind, wie Beile, Meißel, Messer, Scheeren u. s. w. mit fast parallelen Seiten an der Schneide versehen; Rasirmesser werden hohl geschliffen; Schiffe und Vögel haben vorn schmale Kiele, um die Widerstände des Wassers und der Luft leichter überwinden zu können.

2. Die Zusammensetzung und die Zerlegung der Kräfte.

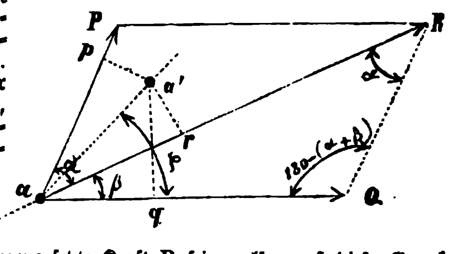
109 **Das Parallelogramm der Kräfte** (Newton 1687). Bisher ließen wir an einer Maschine immer nur eine einzige Kraft der Last entgegen wirken; doch können auch mehrere Kräfte zu demselben Zwecke mit einander verbunden sein. Wenn nun mehrere Kräfte auf einen Körper wirken und sich nicht gerade einander aufheben, so kann das Resultat ihrer Einwirkung nur eine Bewegung sein; diese Bewegung kann man sich meistens auch durch eine einzige Kraft entstanden denken; daher lassen sich mehrere Kräfte durch eine einzige ersetzen. Diejenige Kraft, welche dieselbe Wirkung hervorbringt wie mehrere andere Kräfte, wird die Mittelkraft oder Resultante jener Kräfte genannt, die im Gegensatze hierzu Seitenkräfte oder Componenten heißen. Die analytische Mechanik löst allgemein die Aufgabe, die Resultante beliebig vieler und beliebig gerichteter Kräfte sowohl der Größe als der Richtung nach zu finden. Wir betrachten hier

nur einige specielle, aber wichtige Fälle, zunächst den Fall, daß zwei Kräfte unter einem beliebigen Winkel auf einen materiellen Punkt wirken. Bei diesen Betrachtungen stellen wir uns die Kräfte als Linien dar, durch welche wir zugleich die Größe und die Richtung der Kräfte angeben.

Wenn zwei Kräfte unter einem Winkel auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante sowohl der Größe als auch der Richtung nach gleich der Diagonale desjenigen Parallelogramms, das man aus den Seitenkräften construiren kann. Man nennt dieses Gesetz den Satz vom Parallelogramm der Kräfte.

Beweis 1. Es seien P und Q (Fig. 34) die zwei Kräfte, welche auf den Punkt a wirken; R sei die unbekannte Resultante, α und β die zwei unbekannten Winkel, welche die Resultante mit den beiden Seitenkräften P und Q bildet; die Summe $\alpha + \beta$ dieser Winkel ist bekannt als der Winkel der beiden gegebenen Kräfte. Wenn diese Kräfte einen gewissen Widerstand überwinden, so muß auch die gesuchte Resultante R diesen Widerstand aufheben. Da nun nach dem fünften Axiom jeder Kraft eine gleiche Gegenkraft entspricht, so muß jener Widerstand eine der unbekannten Resultante gleiche und entgegengesetzte Kraft R sein; also muß diese Gegenkraft mit den beiden Kräften P und Q im Gleichgewichte stehen; daher muß für diese drei Kräfte das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten gelten. Um dasselbe anwenden zu können, geben wir dem System der drei Kräfte eine Verschiebung aa′ und fällen dann die Lothe a′p, a′q und a′r auf die Richtungen der drei Kräfte; dann sind ap, aq und ar die Verschiebungen der Kräfte in ihren eigenen Richtungen. Multipliciren wir die drei Kräfte mit diesen Verschiebungen, so entsteht nach dem Princip die Gleichgewichtsgleichung

Fig. 34.



$$R \,.\, ar = P \,.\, ap + Q \,.\, aq \ldots I$$

Bezeichnen wir den Winkel, den die Richtung der Verschiebung $aa' = \varrho$ mit der Kraft Q macht, durch φ, so ist

$$ar = \varrho \cos(\varphi - \beta) = \varrho \cos\varphi \cos\beta + \varrho \sin\varphi \sin\beta,$$

dann $aq = \varrho \cos\varphi$ und endlich

$$ap = \varrho \cos(\alpha + \beta - \varphi) = \varrho \cos(\alpha + \beta) \cos\varphi + \varrho \sin(\alpha + \beta) \sin\varphi.$$

Durch Substitution dieser 3 Werthe in die Gleichung I erhält diese die Form

$$R\varrho \cos\varphi \cos\beta + R\varrho \sin\varphi \sin\beta =$$
$$= P\varrho \cos(\alpha + \beta) \cos\varphi + P\varrho \sin(\alpha + \beta) \sin\varphi + Q\varrho \cos\varphi \text{ oder}$$
$$\varrho \cos\varphi \{R \cos\beta - Q - P\cos(\alpha + \beta)\} = \varrho \sin\varphi \{-R \sin\beta + P \sin(\alpha + \beta)\}$$

Weil die Verschiebung eine ganz willkürliche ist, so muß diese Gleichung für jeden beliebigen Werth von ϱ und φ Geltung haben. Dies ist aber nur möglich, wenn die Klammerausdrücke = Null sind, folglich ist

$$-R \sin\beta + P \sin(\alpha + \beta) = 0 \text{ und}$$
$$R \cos\beta - Q - P \cos(\alpha + \beta) = 0$$

Aus der ersten dieser 2 Gleichungen folgt:

$$II \ldots P = R \sin\beta / \sin(\alpha + \beta) \text{ oder } P : R = \sin\beta : \sin(\alpha + \beta)$$

und aus der zweiten, wenn man den Werth von P in diese substituirt:

$$III \ldots Q = R \sin\alpha / \sin(\alpha + \beta) \text{ oder } Q : R = \sin\alpha : \sin(\alpha + \beta)$$

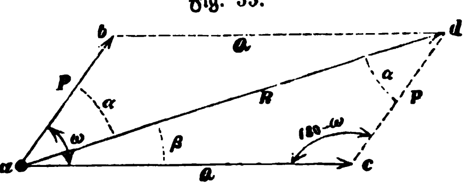
Durch Verbindung dieser 2 Proportionen entsteht die 3gliedrige Proportion

$$P : Q : R = \sin\beta : \sin\alpha : \sin(\alpha + \beta)$$

Ein solches Verhältniß findet nach den Lehren der Trigonometrie nur in einem Dreiecke statt, dessen drei Seiten P, Q und R sind, und in welchem P dem Winkel β und Q dem Winkel α gegenüber liegt. Solche Dreiecke können aber durch unsere Kräfte P, Q und R mit den Winkeln α und β nur entstehen, wenn R die Diagonale eines Parallelogramms ist, dessen Seiten P und Q sind, und wenn diese mit der Diagonale R die Winkel α und β einschließen; hiermit ist dieser Satz bewiesen.

110 **Beweis 2.** Es gibt für diesen wichtigen Satz eine große Anzahl von Beweisen. Für den Schüler, dem die Lehren der Trigonometrie noch fremd sind, wollen wir noch einen zweiten Beweis ausführen, welcher einfacher, wenn auch weniger streng als der obige ist. Dieser zweite Beweis beruht zunächst auf einer Folgerung aus dem vierten Axiom: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nach einander wirken, — und dann darauf, daß nach 24. Kräfte durch die Wege dargestellt werden können, welche ein und derselbe Körper in gleichen Zeiten durch den Einfluß der Kräfte zurücklegen würde. Stellt in dieser Weise ab (Fig. 35) die Kraft P und ac die Kraft Q vor, so würde der Punkt a durch P allein in einer gewissen Zeit nach b gelangen oder durch Q allein in derselben Zeit nach c. Lassen wir zuerst P allein wirken, so gelangt demnach der Punkt a nach b; lassen wir jetzt Q auf denselben wirken, so wird diese Kraft den Punkt b in derselben Richtung und durch einen gleichen Weg forttreiben, wie sie den Punkt a durch den Weg ac fortbewegte; folglich wird der Punkt b den Weg bd durchlaufen, wobei bd gleich und parallel ac ist. Es gelangt also der Punkt a an die gegenüberliegende Ecke des Parallelogramms abcd; dahin wäre er aber auch gekommen, wenn eine Kraft von der Größe und Richtung der Diagonale ad auf ihn gewirkt hätte; folglich ist diese diagonale Kraft die Resultante von P und Q.

Fig. 35.



Experimenteller Nachweis. Auch dafür gibt es eine Reihe von Einrichtungen: Eine Trommel, um welche ein Faden mit einem kleinen Gewichte gewunden ist, und welche auf einer erhöhten Fläche fortrollt; man sieht dann das Gewicht den diagonalen Weg durchlaufen. Ein Apparat, ähnlich den Flugmaschinen auf Theatern. Der Crahay'sche Apparat, bestehend aus vier eingetheilten und verstellbaren Holzschienen, mit denen man Parallelogramme von den verschiedensten Seiten und Winkeln bilden kann; an zwei Ecken sind Messingrollen, über welche zwei Schnüre laufen, die von einem Ringe ausgehen, an welchem eine dritte Schnur hängt. Durch Gewichte, welche an den zwei ersten Schnüren gleich den Seiten und an der dritten gleich der Diagonale des Parallelogramms sind, wird immer Gleichgewicht hergestellt.

111 **Algebraischer Ausdruck des Satzes.** Nach dem Satze vom Parallelogramm der Kräfte kann man die Resultante sowohl der Größe wie der Richtung nach durch Zeichnung finden; da indessen nur die Rechnung genaue Resultate gibt, so muß man den Satz algebraisch ausdrücken, und zwar ist sowohl die Größe der Resultante R, als auch die Größe der Winkel α und β anzugeben, die sie mit den beiden Componenten P und Q einschließt. Die Größe der Resultante wird berechnet nach der Formel

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2 + 2\,PQ \cos \omega} \quad \text{. . . . . (14)}$$

und die Winkel werden gefunden nach den Formeln

$$\sin \alpha = \frac{Q \sin \omega}{R} \quad \text{und} \quad \sin \beta = \frac{P \sin \omega}{R} \quad \text{. . . . . . . (15)}$$

worin $\omega = \alpha + \beta$ den Winkel bedeutet, welchen die Kraftrichtungen einschließen.

Beweis. Schon die Anwendung eines bekannten trigonometrischen Satzes, des sogenannten Cosinus-Satzes auf das $\triangle$ acd (Fig. 35) ergibt $R^2 = P^2 + Q^2 - 2PQ \cos (180 - \omega)$, woraus $R = \sqrt{(P^2 + Q^2 + 2PQ \cos \omega)}$.

Jedoch läßt sich dieser Werth auch aus den in 109. gefundenen Gleichungen II und III berechnen: $P = R \sin \beta / \sin (\alpha + \beta)$ und $Q = R \sin \alpha / \sin (\alpha + \beta)$, worin $\alpha + \beta = \omega$ ist. Aus der ersten dieser Gleichungen ist

$$R = P \sin \omega / \sin (\omega - \alpha) = P \sin \omega / (\sin \omega \cos \alpha - \cos \omega \sin \alpha),$$

und aus der zweiten ergibt sich

$$\sin \alpha = Q \sin \omega / R \quad \text{und} \quad \cos \alpha = \sqrt{(1 - Q^2 \sin^2 \omega / R^2)} = \sqrt{(R^2 - Q^2 \sin^2 \omega)} / R.$$

Setzt man diese Werthe für $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ in den Werth für R ein, so ergibt sich nach einiger Rechnung ebenfalls $R = \sqrt{(P^2 + Q^2 + 2PQ \cos \omega)}$.

Die Formeln (15) für die Winkel lassen sich ebenfalls aus dem $\triangle$ acd (Fig. 35) mittels des Sinussatzes finden; denn nach diesem Satze ist

$$\sin \alpha : \sin (180 - \omega) = Q : R \quad \text{und} \quad \sin \beta : \sin (180 - \omega) = P : R, \text{ woraus}$$

$$\sin \alpha = Q \sin \omega / R \quad \text{und} \quad \sin \beta = P \sin \omega / R.$$

Jedoch ergeben sich dieselben auch direct aus den schon in 109. gefundenen Gleichungen II und III, wenn in denselben ω an die Stelle von $\alpha + \beta$ gesetzt wird.

Mittels dieser algebraischen Ausdrücke lassen sich einige Folgerungen gewinnen, von denen eine schon aus Axiom 3. geschlossen und im Beweis 109. enthalten ist. Setzt man in Formel (14) den Winkel $\omega = 0$, so findet man $R = P + Q$ oder

1. Wenn zwei oder mehrere Kräfte in einer Richtung auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante gleich der Summe derselben.

Wenn dagegen in Formel (14) $\omega = 180^0$ gesetzt wird, so ergibt sich $R = P - Q$ oder

2. Wenn zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante gleich der Differenz derselben.

Ist endlich in dem letzten Falle $P = Q$, so ist $R = 0$, d. h.

3. Gleiche, aber in entgegengesetzter Richtung auf einen Punkt wirkende Kräfte heben sich auf.

Da $\cos \omega$ zwischen $+ 1$ und $- 1$ liegt, so sind die zwei Werthe $P + Q$ und $P - Q$ der größte und der kleinste, den die Resultante haben kann, oder

4. Die Resultante zweier auf einen Punkt wirkenden Kräfte ist (die Grenzfälle ausgenommen) kleiner als die Summe und größer als die Differenz derselben.

Aus den Formeln (15) folgt, daß $\alpha = \beta$ ist, wenn $P = Q$ ist, daß dagegen $\alpha > \beta$, wenn $P < Q$ und $\alpha < \beta$, wenn $P > Q$ ist.

5. Die Resultante zweier gleichen Kräfte halbirt den Winkel der Kräfte; die Resultante ungleicher Kräfte liegt mehr in der Nähe der größeren Kraft.

Wenn auf einen Punkt mehrere Kräfte wirken und deren Resultante gesucht werden soll, so sucht man die Resultante zweier Kräfte, dann die Resultante dieser Resultante und einer dritten Kraft u. s. w. Für drei nicht in einer Ebene wirkenden Kräfte ergibt sich dann, daß die Resultante gleich der Diagonale eines aus den drei Kräften gebildeten Parallelepipedons ist (Fig. 36); für mehrere in einer Ebene wirkenden Kräfte ist dieselbe die letzte Seite eines Polygons (Fig. 37), das dadurch entsteht, daß man durch den Endpunkt der ersten eine Gerade gleich und parallel der zweiten, durch den Endpunkt dieser eine Gerade gleich und parallel der dritten u. s. w. zieht. (Parallelepipedon und Polygon der Kräfte.)

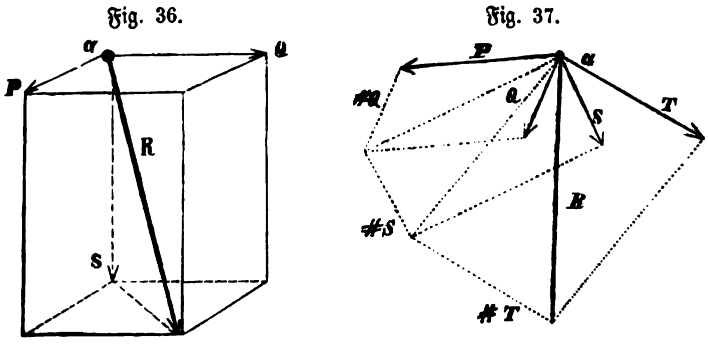
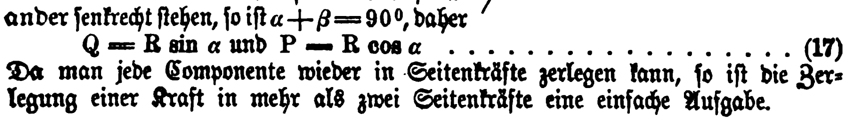


Fig. 36. Fig. 37.

112 Zerlegung der Kräfte. Nachdem wir die Zusammensetzung von Kräften kennen gelernt haben, die auf einen Punkt wirken, wollen wir, bevor diese Aufgabe für einen Körper uns beschäftigen soll, zuerst die wichtige umgekehrte Aufgabe lösen, nämlich die Zerlegung einer Kraft in zwei Kräfte, die auf denselben Punkt wirken. Gewöhnlich ist hierbei die Richtung dieser Seitenkräfte bekannt und soll daher nur die Größe derselben gefunden werden. Diese Aufgabe ist offenbar nur eine Umkehrung des Parallelogramms der Kräfte. Man findet

daher durch Zeichnung (Fig. 38) die Seitenkräfte einer gegebenen Kraft, indem man durch den Endpunkt derselben Parallele zu den gegebenen Richtungen der Seitenkräfte zieht; diese Parallelen schneiden von den Richtungslinien Stücke ab, welche an Größe den Seitenkräften gleich sind.

Fig. 38.



Durch Rechnung findet man dieselben nach den schon gefundenen Formeln

$$P = \frac{R \sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)} \text{ und } Q = \frac{R \sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)} \quad \ldots (16)$$

welche sich aber auch sofort durch Anwendung des bekannten Sinus-Satzes auf eines der beiden Dreiecke finden lassen.

Sollen die beiden Componenten auf einander senkrecht stehen, so ist $\alpha + \beta = 90^0$, daher

$$Q = R \sin\alpha \text{ und } P = R \cos\alpha \quad \ldots\ldots (17)$$

Da man jede Componente wieder in Seitenkräfte zerlegen kann, so ist die Zerlegung einer Kraft in mehr als zwei Seitenkräfte eine einfache Aufgabe.

113 **Anwendung des Kräfteparallelogramms.** Ein Schiffer wendet es unbewußt an, wenn er mit seinem Kahne eine bestimmte Stelle des gegenüberliegenden Ufers erreichen will. Das Gesetz wird von der Natur selbst ausgeführt, wenn ein Stein von einem Mastbaume oder aus einem Eisenbahnwagen fällt; der Stein fällt in diagonaler Richtung zu Boden. (Vogelflug, Schwimmen der Fische und Menschen ꝛc.). Die Weltkörper schlagen in jedem Augenblicke die diagonale Richtung zwischen den beiden Kräften ein, die auf sie wirken, zwischen ihrer eigenen leb. Kr. und der Anziehung eines Centralkörpers. Zahlreich sind insbesondere die Anwendungen der Zerlegung der Kräfte. Wenn ein Körper sich nicht in der Richtung bewegen kann, in welcher eine Kraft wirkt, so kommt nur die in die Richtung der Bewegung fallende Componente zur Wirkung; umgekehrt kann daher auch eine Kraft in einer anderen Richtung wirken, als in ihrer eigenen, aber nur mit einem Theile ihres Betrages. Diesen Theil findet man, indem man die nach jener Richtung gedachte Componente sucht; ergibt sich dieselbe = Null oder imaginär, so ist die geforderte Wirkung unmöglich; hat sie aber noch einen reellen, wenn auch noch so kleinen Werth, so kann die Kraft noch eine Wirkung in der verlangten Richtung hervorbringen. Soll z. B. eine Kraft einen Druck auf einen Körper hervorbringen, so muß man sie immer in eine zur Druckfläche senkrechte und eine parallele Componente zerlegen; die letztere geht für den Druck verloren, die erstere gibt die Größe des Druckes an. Soll aber ein Körper auf einer Fläche fortbewegt werden, so geht die zu dieser Fläche senkrechte Druckcomponente für jene Fortbewegung verloren, ja sie erzeugt sogar das Haupthinderniß der Bewegung, die Reibung; nur die zur Fläche parallele Componente erzeugt die Bewegung. Diese Grundsätze sind bei den folgenden Aufg. anzuwenden; hierbei sind insbesondere die Fln. (17) wichtig.

114 **Aufg.** 142. Welches ist die Resultante zweier auf einander senkrechten Kräfte P u. Q? Aufl.: $R = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$. — A. 143. Welches ist die Resultante von 80^{kg} und 100^{kg}, die einen Winkel von 60° einschließen? Aufl.: $R = 156{,}205^{kg}$. — A. 144. Welches von 6 und 11^{kg}, die einen Winkel von 30° bilden? Aufl.: $R = 16{,}47^{kg}$. — A. 145. Welches sind die Componenten von 100^{kg}, wenn sie Winkel von 30° und 60° mit der Mittelkraft machen? Aufl.: $P = 50$, $Q = 86{,}6^{kg}$. — A. 146. Welches ist der Druck, den die Last Q auf eine schiefe Ebene vom Neigungswinkel α ausübt? Anl.: Man zerlege die Last in eine senkrechte und eine parallele Componente und beweise, daß die erste $D = Q \cos\alpha$ (der Druck), die letzte $Q \sin\alpha$. — A. 147. Das Gesetz von der schiefen Ebene für beide Wirkungsarten der Kraft durch das Kräfteparallelogramm zu beweisen. Anl.: Man zerlege die Last für die erste Art, wie es so eben in A. 146 geschehen ist, und für die zweite Art in eine senkrechte und eine wagrechte Componente. — A. 148. Wie groß ist für die zweite Art der Druck auf die schiefe Ebene? Anl.: Gleich der eben gefundenen senkrechten Componente $D = Q \sec\alpha$. Da $\sec\alpha$ immer größer als 1 ist, so ist der Druck immer größer wie die Last; wie ist dies zu erklären? D ist nur in dem Grenzfalle = Q, wenn $\sec\alpha = 1$, wenn also $\alpha = 0$. — A. 149. Das Gesetz für den Keil durch das Kräfteparallelogramm zu beweisen. — A. 150. Durch die Kniepresse (Fig. 39) kann auf die Unterlage ab ein sehr großer Druck mittels einer kleinen Kraft P ausgeübt werden; dies zu beweisen. Anl.:

Man zerlege P in zwei Componenten in den Richtungen cd und ce, lasse dann den Winkel dce immer größer werden und wiederhole diese Construction, so wird sich herausstellen, daß diese Componenten sogar unendlich werden können. In welchem Falle? — A. 151. Zu zeigen, wie eine fliegende Brücke durch die Stromkraft über den Fluß getrieben werden kann. And.: Man zerlege die Stromkraft ab (Fig. 40) in 2 Seitenkräfte, bc senkrecht und ac parallel zu der Brücke; die senkrechte Componente bc kommt allein zur Wirkung. Diese zerlege man in eine Kraft cd, parallel zu dem Strome, und eine Kraft bd, senkrecht zu dem Strome; durch die letztere ist die Ueberfahrt möglich. — A. 152. In ähnlicher Weise (Fig. 41) zu zeigen, daß man auf der See durch Anwendung von Segeln nach allen Richtungen, nur nicht gerade dem Winde entgegen, fahren kann (Kreuzen). Auch bei den Windmühlen wirkt die Kraft in ähnlicher Weise, sowie bei dem Spieldrachen (Windvogel) der Knaben, beim schiefen Stoße des Wassers gegen Räderschaufeln und Steuerruder u. s. w. — A. 153. Wie groß ist die wirksame Componente der Windkraft R, wenn die Bezeichnungen von Fig. 41 gelten? Aufl.: $P = R \sin\beta \sin\alpha$; sind α und β nur 30°, so ist P immer noch $= \frac{1}{4}$ R. — A. 154. Wie groß ist die Kraft P, welche bei beliebiger Richtung einen Körper vom Gewichte Q mit Ueberwindung der Reibung auf einer schiefen Ebene aufwärts zu ziehen vermag? And.: Man zerlege sowohl Q wie P (Fig. 42) in Componenten, parallel und senkrecht zu der schiefen Ebene; die senkrechten Componenten bilden den Druck, der mit f, dem Reibungscoëfficienten multiplicirt die Reibung gibt. Diese und die parallele Componente von Q müssen zusammen der parallelen Componente von P gleich sein. Hieraus folgt $P = Q(\sin\alpha + f\cos\alpha)/(\cos\beta + f\sin\beta)$. Bei wagrechter Richtung von P ist $\beta = -\alpha$, folglich ist dann $P = Q(f + \operatorname{tg}\alpha)/(1 - f\operatorname{tg}\alpha)$. — A. 155. Hat man eine drehbare schiefe Ebene, die man unter beliebigem Neigungswinkel aufstellen kann, so ist es nach Amonton möglich, den Reibungscoëfficienten f für den Uebergang aus Ruhe in Bewegung zu finden, da im Beginne der Bewegung die Reibung gleich der parallelen Componente der Last ist; wie groß ist der Coëfficient f? Aufl.: $fQ\cos\varphi = Q\sin\varphi$; hieraus $f = \operatorname{tg}\varphi$; φ wird **Reibungswinkel** genannt. — A. 156. Wie groß ist die Kraft zur Ueberwindung der Last Q und der Reibung bei der Schraube? Aufl.: Hier gilt die letzte Formel in A. 155. Man kann in derselben $h/2r\pi$ statt $\operatorname{tg}\alpha$ setzen. — A. 157. Das Hebelgesetz für beliebig gerichtete Kräfte zu beweisen. And.: Man suche (Fig. 43) z. B. die senkrechte Componente ab von P; sie ist $P\cos\alpha$; das Moment derselben ist $P \cdot ac \cdot \cos\alpha = P \cdot cd$, gleich dem Momente von P selbst.

Fig. 39.

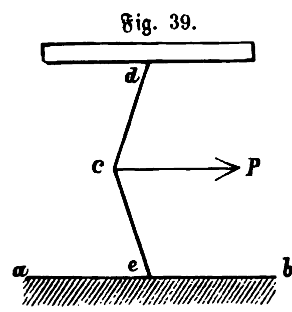


Fig. 40.

Fig. 41.

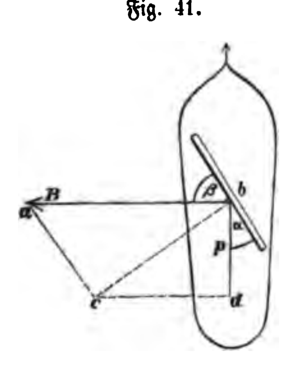
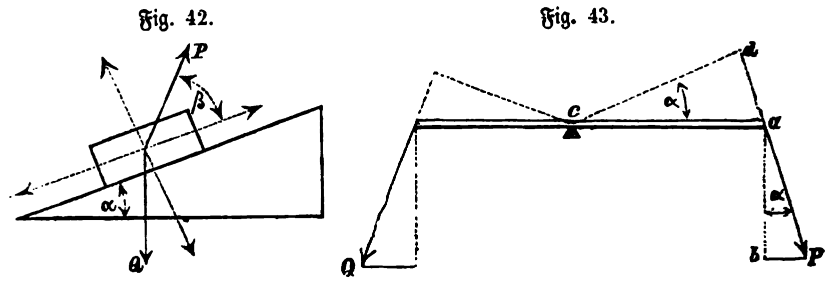


Fig. 42. Fig. 43.



115 **Resultante von Kräften, die auf einen Körper wirken.** Wir betrachten hier nur den Fall, daß die Kräfte einander parallel sind, und daß auch die Resultante den

Seitenkräften parallel sein soll. Zunächst suchen wir die Resultante von zwei parallelen Kräften. In diesem Falle muß nicht blos die Größe der Resultante gefunden werden, sondern auch derjenige Punkt, an welchem die Resultante angebracht werden müßte, um dieselbe Wirkung wie die Seitenkräfte hervorbringen zu können; dieser Punkt heißt der Angriffspunkt der Resultante. Wenn nun, wie vorausgesetzt, die Resultante dieselbe Richtung wie die Seitenkräfte haben soll, so gilt folgender Satz: *Die Resultante zweier parallelen Kräfte ist gleich der Summe derselben; der Angriffspunkt der Resultante theilt die Verbindungsgerade der Angriffspunkte der Kräfte in zwei Stücke, die sich umgekehrt verhalten wie die gegebenen Kräfte.*

Beweis. Es seien (Fig. 44) P und Q die beiden auf die Punkte a und b wirkenden Kräfte. Zum Zwecke des Beweises bringen wir in a und b zwei gleiche, aber entgegengesetzte Kräfte S an. Da diese einander aufheben, so ist die Resultante der vier Kräfte P, S, Q und S auch die Resultante von P und Q. Die Resultante von P und S ist nach dem Kräfteparallelogramm = ad, die von S und Q = bf. Wenn wir die Resultante von ad und bf gefunden haben, so haben wir auch die von P und Q. Nun darf man aber nach dem dritten Axiom den Angriffspunkt jeder Kraft in ihrer eigenen Richtung verlegen; die Wirkung von ad und bf wird also dieselbe bleiben, wenn wir diese Kräfte auf den unveränderlich mit ab verbundenen Punkt g wirken lassen. Es sei gh die an den Punkt g verlegte Kraft ad und gi die verlegte Kraft bf. Um die Resultante dieser beiden Kräfte zu finden, zerlegen wir gh nach dem Kräfteparallelogramm in zwei Componenten, parallel zu ab und zu P; die erste Componente gl muß dann = S, die zweite gk = P sein; ebenso zerlegen wir gi in gn = S und gm = Q. Die beiden Kräfte S heben einander auf, weil sie einander gleich und entgegengesetzt sind; die beiden Kräfte gk und gm wirken nach einer Richtung auf einen Punkt, folglich ist ihre Resultante gleich ihrer Summe P + Q. Hiermit ist der erste Theil des Lehrsatzes bewiesen. Für den zweiten Theil benutzen wir die Aehnlichkeit der Dreiecke ghk und gac, sowie der Dreiecke gmi und gcb; hieraus ergeben sich folgende zwei Proportionen: $gk : hk$ oder $P : S = gc : ac$, woraus $S \,.\, gc = P \,.\, ac$, und $gm : mi$ oder $Q : S = gc : bc$, woraus $S \,.\, gc = Q \,.\, bc$. Durch Gleichsetzung der zwei letzten einander gleichen Werthe erhalten wir $P \,.\, ac = Q \,.\, bc$ oder $P : Q = bc : ac$, womit auch der zweite Theil des Lehrsatzes bewiesen ist.

Fig. 44.

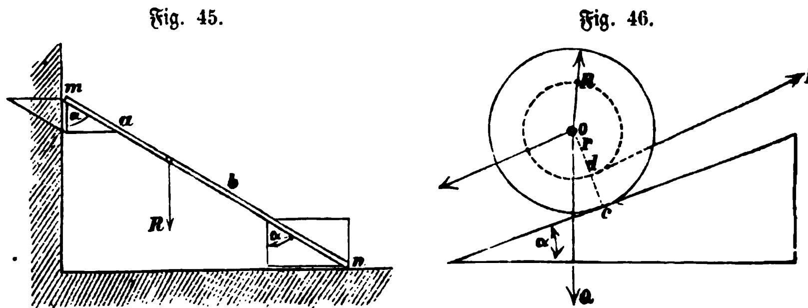
Vermittelst dieses Satzes kann man eine auf einen Körper wirkende Kraft in zwei derselben parallele Seitenkräfte zerlegen, deren Summe indeß immer der gegebenen Kraft gleich sein muß. Außerdem ergibt sich aus demselben, daß die parallele Resultante vieler parallelen Kräfte gleich der Summe derselben ist; den Angriffspunkt dieser Resultante findet man, indem man zuerst nach dem Lehrsatze den Angriffspunkt der Resultante zweier Kräfte sucht, dann diesen Punkt mit dem Angriffspunkte der dritten Kraft verbindet und wieder nach dem Satze den Angriffspunkt der Resultante jener ersten Resultante und der dritten Kraft sucht; dann hat man den Angriffspunkt der Resultante dreier Kräfte. Fährt man in dieser Weise fort, so findet man den Angriffspunkt der Resultante vieler parallelen Kräfte, die auf einen Körper wirken.

Den Angriffspunkt der Resultante mehrerer parallelen Kräfte nennt man den *Mittelpunkt der parallelen Kräfte*; derselbe hat folgende zwei aus seiner Definition hervorgehende Eigenschaften: 1. *Bringt man im Mittelpunkte der parallelen Kräfte eine Kraft gleich der Summe derselben an, so hat diese dieselbe Wirkung wie alle Seitenkräfte zusammen.* 2. *Wenn man in dem Mittelpunkte der parallelen Kräfte eine Kraft anbringt, welche der Resultante gleich, aber entgegengesetzt*

ist, so werden alle Seitenkräfte dadurch aufgehoben. Diese Eigenschaft hat nur der Mittelpunkt der parallelen Kräfte.

116 **Aufg.** 158. An den beiden Enden einer Stange von 3^m Länge wirken parallele Kräfte von 87 und 57^{kg}; wie groß ist die Resultante und wo muß sie angebracht werden? Aufl.: $R = 144^{kg}$; ist der Abstand der Resultante von der ersten Kraft $= x$, also von der zweiten $= 3 - x$, so ergibt sich $87 : 57 = 3 - x : x$ oder $144 : 57 = 3 : x$, woraus $x = 1^3/_{16}{}^m$. A. 159. An beiden Enden einer 4^m langen Stange wirken parallele Kräfte von 100 und 50^{kg}; wo ist der Angriffspunkt der Resultante? Die beiden Abstände müssen sich wie 1 : 2 verhalten, sind also $1^1/_3$ und $2^2/_3{}^m$. — A. 160. Welches sind allgemein die beiden Theile a und b einer Stange von der Länge l, an deren Enden die parallelen Kräfte P und Q wirken? Aufl.: Nach der Methode in A. 158 ist $a = l \,.\, Q / (P + Q)$ und $b = l P / (P + Q)$. A. 161. Das Hebelgesetz mittels der Sätze in 115. zu beweisen. And.: In dem Angriffspunkte der Resultante bringt man eine der Resultante gleiche, aber entgegengesetzte Kraft an, nämlich die Festigkeit einer Stütze; dann muß Gleichgewicht stattfinden. — A. 162. Wo liegt die Resultante zweier gleichen, parallelen, aber in entgegengesetzter Richtung auf eine Linie wirkenden Kräfte? Aufl.: Nimmt man P positiv, so muß man Q negativ nehmen; es sind dann die beiden Theile der Linie gleich $- Ql / (P - Q)$ und $Pl / (P - Q)$, welche Werthe für $P = Q$ unendlich groß sind, während dann die Resultante $P - Q$ selbst = Null ist. Dieses parador erscheinende Resultat, daß die Resultante Null im Unendlichen anzubringen sei, bedeutet, daß ein Kräftepaar (couple), wie Poinsot zwei parallele, gleiche und entgegengesetzte Kräfte nennt, keine Resultante hat, also nicht durch eine einzige Kraft ersetzt oder aufgehoben werden kann. — A. 163. Zwei Arbeiter tragen an einer Stange 75^{kg}; der eine ist zweimal so weit von der Last entfernt, wie der andere; wie viel hat jeder zu tragen? Aufl.: 25^{kg}; 50^{kg}. — A. 164. Zwei Leute tragen an einer Stange 90^{kg}; der eine soll nur 10, der andere 80^{kg} tragen; wie ist dies einzurichten? Aufl.: Der letztere muß der Last 8 mal näher sein als der erstere; folglich muß die Last in $^1/_9$ der Stange bei dem letzten Arbeiter angehängt werden. — A. 165. Dieselbe Aufgabe allgemein zu lösen. Aufl.: Die beiden Theile der Stange sind Ql / R und Pl / R, wo $R = P + Q$. — A. 166. Die Last R ist von beiden Enden um a und b entfernt; wie groß sind P und Q? Aufl.: $P = b R / (a + b)$ und $Q = a R / (a + b)$. — A. 167. Die gewichtlose Stange l (Fig. 45) ist gegen eine Wand unter dem Winkel α gestellt und trägt in den Abständen a und b von den beiden Enden die Last R. Welchen Druck übt dieselbe gegen Wand und Boden aus, und mit welcher Schubkraft strebt sie an Wand und Boden hinzu-

Fig. 45. Fig. 46.



gleiten? Aufl.: Verticalschub bei $m = b R / l$; Druck in der Stabrichtung bei $m = b R / l \cos \alpha$; Druck gegen die Wand bei $m = b R \operatorname{tang} \alpha / l$; Verticaldruck bei $n = b R \cos \alpha / l \cos \alpha + a R / l = R$; endlich Horizontalschub bei n gleich dem Horizontaldruck bei $m = b R \operatorname{tang} \alpha / l$. — A. 168. Experiment von Komerell in Tübingen (1868). Um eine Walze r, die mit größeren Endscheiben R (Fig. 46) auf einer schiefen Ebene liegt, ist eine Schnur so gewunden, daß das freie Ende derselben an der unteren Seite der Walze die schiefe Ebene hinaufgeht. Welche Kraft muß an dieser Schnur wirken, um das Gewicht Q der Walze und die Reibung zu überwinden? Aufl.: Die parallele Componente von Q ist $Q \sin \alpha$, die Reibung $f Q \cos \alpha$. Damit diese zwei parallelen nach unten wirkenden Kräfte durch die bei d nach oben wirkende Kraft im Gleichgewicht gehalten werden können, muß nach 115. sein $od \,.\, Q \sin \alpha = cd \,.\, f Q \cos \alpha$, woraus $\operatorname{tg} \alpha = f \,.\, cd / od = f (R - r) / r$. Wenn α diese Größe hat, und wenn $P = Q \sin \alpha + f Q \cos \alpha$, so findet Gleichgewicht statt. Wenn dagegen α kleiner oder P größer wird, so rollt die Walze die schiefe Ebene hinauf, im umgekehrten Falle hinab. Dieses Experiment ist eine Abänderung des bekannten Joujou-Spieles.

Der Schwerpunkt. (Archimedes, 220 v. Chr.)

117 Von der Einwirkung vieler parallelen Kräfte auf einen Körper gibt uns die Natur selbst ein Beispiel, nämlich die Anziehung aller Atome eines Körpers durch die Erde. Diese anziehenden Kräfte sind bekanntlich alle nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet, weichen also bei den Körpern auf der Erdoberfläche so wenig von einander ab, daß man sie als parallel ansehen muß. *Den Mittelpunkt aller dieser parallelen Schwerkräfte eines Körpers nennt man den Schwerpunkt.* Dieser Punkt hat folgende Eigenschaften:

1. *In dem Schwerpunkte eines Körpers kann man sich das ganze Gewicht desselben vereinigt denken.* Denn die Wirkung aller Schwerkräfte ist nach dem 1. Satze über den Mittelpunkt paralleler Kräfte genau dieselbe, wie die Wirkung ihrer Resultante d. h. des Gewichtes, wenn man diese Resultante in ihrem Angriffspunkte d. i. im Schwerpunkte anbringt. — Will man daher das statische Moment eines Körpergewichtes finden, so muß man den Abstand des Schwerpunktes dieses Körpers in Rechnung ziehen. Der Schwerpunkt ist auch der Mittelpunkt anderer parallelen Kräfte; der Angriffspunkt der Resultante irgend welcher parallelen, gleichen und gleichmäßig vertheilten Kräfte ist daher in dem Schwerpunkte zu suchen.

2. *Wird der Schwerpunkt eines Körpers unterstützt, so ruht der Körper;* ist der Schwerpunkt nicht unterstützt, so fällt der Körper. Denn alle Schwerkräfte werden aufgehoben, oder das ganze Gewicht wird getragen, wenn in dem Mittelpunkte dieser Kräfte eine Kraft angebracht wird, welche der Resultante gleich und entgegengesetzt ist, nach dem 2. Satze über den Mittelpunkt paralleler Kräfte. Wenn demnach in dem Schwerpunkte die Festigkeit einer Stütze, welche ja nach dem fünften Axiom einen dem Gewichte gleichen Gegendruck ausübt, angebracht wird, so muß der Körper ruhen. Unterstützt ist der Schwerpunkt, wenn vertical über oder unter demselben eine feste Verbindung mit der Erde hergestellt ist, also auch, wenn ein durch denselben gehendes Loth noch in der Grundfläche des Körpers einmündet.

Experimentelle Nachweise für diese Sätze sind: Platten von verschiedenen Formen, die an ihren Schwerpunkten eine kleine Pfanne haben, mit der man sie auf Spitzen hängt. Die chinesischen Purzelmänner, der Mann mit der Säge, der schottische Dreher. Schiefe Körper wie die Thürme zu Pisa und Bologna, fallen nicht, wenn das durch den Schwerpunkt gehende Loth noch in der Grundfläche eintrifft. Beim Tragen von Lasten biegen wir uns so, daß der durch die Last verschobene Schwerpunkt wieder senkrecht über die von den Füßen begrenzte Stützfläche fällt. Ist ein anderer Punkt als der Schwerpunkt unterstützt, so dreht sich derselbe, bis er in der tiefsten Lage, senkrecht unter dem Stützpunkte ist: berganlaufender Kegel, berganlaufende Schachtel, Stehaufmännchen, falsche Würfel.

118 **Bestimmung des Schwerpunktes.** Der Bestimmungssatz des Schwerpunktes lautet: *Das statische Moment des in dem Schwerpunkte vereinigt gedachten Körpergewichtes ist gleich der Summe der statischen Momente aller Gewichte der einzelnen Körpertheile in Bezug auf dieselbe Drehachse.* Statt der Gewichte können in diesem Satze auch die Massen gesetzt werden, und da bei homogenen Körpern die Massen den Rauminhalten proportional sind, so können bei solchen Körpern die Volumina an die Stelle der Gewichte treten.

Beweis. Denken wir uns einen Körper um irgend eine Achse außerhalb seines Schwerpunktes gedreht, so beschreibt bei einer vollständigen Umdrehung jeder Punkt einen Kreis, dessen Radius die senkrechte Entfernung des Punktes von der Drehachse ist; der Weg aber, den jeder einzelne Punkt in der Richtung der hier in Rede stehenden Kraft, der Schwerkraft, also in lothrechter Richtung, zurücklegt, ist zweimal der Durchmesser dieses Kreises. Bezeichnen wir das im Schwerpunkt vereinigt gedachte ganze Körpergewicht mit P und den Abstand desselben von der Drehachse mit R, so ist die Arbeit des ganzen Körper-

gewichtes = 4PR; bezeichnen wir die Gewichte der einzelnen Massenpunkte oder auch der einzelnen Körpertheile mit $p, p', p'' \ldots.$, und ihre Abstände oder auch die Abstände ihrer Schwerpunkte von der Drehachse mit $r, r', r'' \ldots.$, so sind die Arbeiten der einzelnen Gewichte $4pr$, $4p'r'$, $4p''r''$ u. s. w. Nach der ersten Eigenschaft des Schwerpunktes ist aber die Wirkung, also auch die Arbeit des im Schwerpunkte vereinigt gedachten Gewichtes gleich der Summe der Wirkungen, also auch gleich der Summe der Arbeiten der Gewichte der einzelnen Körpertheile; folglich

$$4PR = 4pr + 4p'r' + 4p''r'' + \ldots. \text{ woraus } PR = pr + p'r' + p''r'' + \ldots.$$

Bekanntlich wird nun das Product einer Kraft mit dem Abstande ihres Angriffspunktes von einer Drehachse statisches Moment genannt; also sagt die letzte Gleichung aus, daß das statische Moment des ganzen im Schwerpunkte vereinigten Körpergewichtes gleich ist der Summe der statischen Momente der einzelnen Körpertheile. Für homogene Körpergewichte ergibt sich, indem wir einfach jedes einzelne p durch das specifische Gewicht dividiren

$$VR = vr + v'r' + v''r'' + \ldots.$$

Nach diesem Satze wird die Lage des Schwerpunktes eines Körpers bestimmt, indem man eine beliebige Gerade als Drehachse annimmt und die statischen Momente der einzelnen Körpertheile in Bezug auf dieselbe aufsucht; da ein Körper aus unendlich vielen Molekülen besteht, so sind zur vollständigen Durchführung der Summirung aller dieser Momente die Mittel der Infinitesimalrechnung erforderlich; indessen sind in manchen Fällen nur die Momente einzelner Körpertheile zu summiren, wie die folgenden Aufgaben zeigen werden; diese Summe wird dann gleich dem Producte des ganzen Körpers mit dem unbekannten Abstande des Schwerpunktes von der Drehachse gesetzt, wodurch eine Gleichung entsteht, aus welcher dieser Abstand gefunden werden kann. — Dreht man einen Körper um eine beliebige Drehachse, so ändern sich weder sein Gewicht, noch die Abstände von der Drehachse; folglich bleibt auch die Lage des Schwerpunktes nach dem Bestimmungssatze dieselbe. *Die Lage des Schwerpunktes eines Körpers ist demnach unabhängig von der Lage des Körpers und nur bedingt von der Form desselben.*

Aus dem Bestimmungssatze folgt auch die zweite Eigenschaft des Schwerpunktes. Wenn nämlich der Schwerpunkt in der Drehachse oder im Stützpunkte liegt, so ist der Abstand desselben von dem Stützpunkte, und demnach das Moment des ganzen Körpers gleich Null; folglich ist auch die zweite Seite der Gleichung, die Summe der statischen Momente aller Körpertheile gleich Null, d. h. es findet nach dem Hebelgesetze Gleichgewicht statt; der Körper ruht, wenn der Schwerpunkt unterstützt ist.

Diese Folgerung aus dem Bestimmungssatze gibt uns die Möglichkeit, für zahlreiche einfache Körper und dadurch nach dem Bestimmungssatze auch für weniger einfache Körper den Schwerpunkt mit den Mitteln der elementaren Mathematik zu bestimmen. Damit nämlich die Summe der statischen Momente eines im Schwerpunkte unterstützten Körpers gleich Null sei, muß zu jedem materiellen Punkte auf der einen Seite des Schwerpunktes ein genau gleich weit entfernter schwerer Punkt auf der anderen Seite vorhanden sein, der durch sein negatives statisches Moment das positive des ersten Punktes aufhebt; dies ist nur dann der Fall, wenn der Schwerpunkt genau in der Mitte liegt, wobei indeß die Homogenität überall vorausgesetzt werden muß; folglich liegen die Schwerpunkte der regelmäßigen Körper, der regelmäßigen schweren Flächen, der materiellen Linie in den Mittelpunkten. Die gerade Linie, der Kreis, die regelmäßigen Vielecke, die Kugel, die regelmäßigen Körper, die Ringe haben ihren Schwerpunkt in ihrem Mittelpunkte; Walzen, regelmäßige Prismen, Rotationskörper, die aus 2 gleichen Hälften bestehen, in der Mitte ihrer Achsen, Parallelogramme und Parallelepipeda im Schnitte ihrer Diagonalen. Der Schwerpunkt eines Dreiecks muß in jeder Transversalen liegen, weil jede Transversale eine Gegenseite und alle zu dieser parallelen Dreieckslinien halbirt; folglich *liegt der Schwerpunkt eines Dreiecks im Schnittpunkte der Transversalen*, welcher bekanntlich um 1/3 der Transversalen von ihrem Fußpunkte entfernt ist.

119 Aufg. 169. *Schwerpunkt einer Pyramide und eines Kegels.* Zieht man in der dreiseitigen Pyramide (Fig. 47) die Transversalen cf und df zweier Seitenflächen, so liegen die Schwerpunkte dieser Dreiecke in den Punkten g und h, für welche $gf = \frac{1}{3} cf$ und $hf = \frac{1}{3} df$. Hieraus folgt, daß $gh \parallel cd$ ist. Der Schwerpunkt der Pyramide muß in der Linie dg liegen; denn diese Linie geht durch die Schwerpunkte aller zu abc parallelen Dreiecke, welche man sich bis zur Spitze hin immer kleiner werdend und die ganze Pyramide ausfüllend denken kann. Ebenso muß der gesuchte Schwerpunkt in der Geraden ch liegen. Diese zwei Geraden dg und ch müssen sich einander schneiden, weil sie sich in der Ebene des Dreiecks cfd befinden. Folglich muß der Schwerpunkt der Pyramide in dem Schnitte s dieser beiden Linien liegen. Es ergibt sich nun leicht aus der Aehnlichkeit der Dreiecke, daß $gs = \frac{1}{3} sd$, also $= \frac{1}{4} gd$ ist. Man findet demnach den Schwerpunkt einer dreiseitigen, wie auch jeder anderen Pyramide und jedes Kegels, indem man die Spitze mit

dem Schwerpunkte der Grundfläche verbindet und von dieser Strecke 1/4 vom Fußpunkte aus abschneidet. — A. 170. **Schwerpunkt eines Pyramiden- und eines Kegelstumpfes.** Denken wir uns durch den Schwerpunkt a der Grundfläche (Fig. 48) eine Drehachse gelegt, so muß die Summe der statischen Momente des Stumpfes und der Ergänzungsspitze nach dem Bestimmungssatze gleich dem statischen Moment der ganzen Pyramide sein. Sind g, g′ und g″ die Volumina des Stumpfes, der ganzen Pyramide und der Spitze, und s, s′ und s″ bezüglich die Schwerpunkte derselben, so muß demnach sein: $g \,.\, as + g'' \,.\, as'' = g' \,.\, as'$. Wenn wir nun zwei homologe Seiten der beiden Grundflächen

Fig. 47.

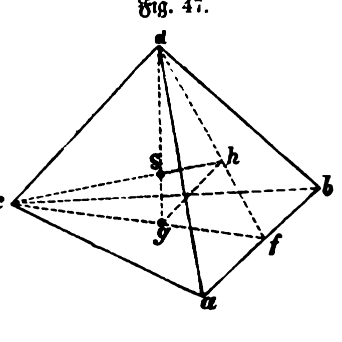
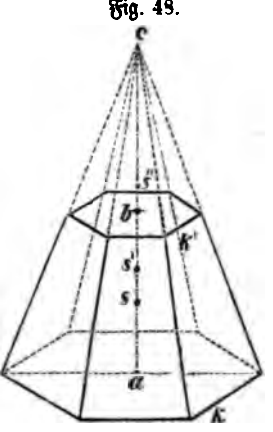


Fig. 48.



mit k und k′ bezeichnen, so ist $g'' = \frac{k'^3}{k^3}\, g'$ und $g = \left(1 - \frac{k'^3}{k^3}\right) g'$, woraus durch Substitution in die Bedingungsgleichung entsteht $\left(1 - \frac{k'^3}{k^3}\right) . as + \frac{k'^3}{k^3} \,.\, as'' = as'$. Setzen wir die Verbindungslinie der Schwerpunkte der beiden Grundflächen $ab = h$, und bedenken, daß $ac : bc = k : k'$ oder $ac - bc : bc = k - k' : k'$ oder $bc = \frac{hk'}{k-k'}$, so ergibt sich $as' = {}^1/_4\, ac = {}^1/_4 \left(h + \frac{hk'}{k-k'}\right) = {}^1/_4 \,.\, \frac{hk}{k-k'}$ und $as'' = h + {}^1/_4 \,.\, \frac{hk'}{k-k'} = \frac{h}{4} \,.\, \frac{4k-3k'}{k-k'}$. Wenn wir diese Werthe für as′ und as″ in die Bedingungsgleichung substituiren, so entsteht nach einiger Rechnung

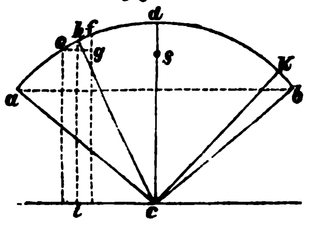
$$as = \frac{h}{4} \,.\, \frac{k^4 - 4kk'^3 + 3k'^4}{(k-k')(k^3-k'^3)} = \frac{h}{4} \,.\, \frac{k^2 + 2kk' + 3k'^2}{k^2 + kk' + k'^2}$$

Sind r und r′ die Grundflächenradien eines Kegelstumpfes, so ist

$$as = \frac{h}{4} \,.\, \frac{r^2 + 2rr' + 3r'^2}{r^2 + rr' + r'^2}$$

A. 171. **Schwerpunkt eines Kreisbogens.** Der Schwerpunkt des Bogens adb (Fig. 49) liegt auf dem mittleren Radius cd. Um die Entfernung cs desselben von dem Mittelpunkte c und der durch denselben gedachten Drehachse zu finden, benutzen wir den Bestimmungssatz. Diesem gemäß muß, wenn α die Länge des Bogens ist, das Product $\alpha \,.\, cs$ gleich der Summe der Momente der einzelnen Bogen-Elemente sein. Das Moment des Bogen-Elementes ef ist $ef \,.\, hi$ oder $ch \,.\, eg = r \,.\, eg$. Daraus folgt, daß die Momentensumme $= r \,.\, ab$ ist, und daß daher die Gleichung stattfindet $\alpha \,.\, cs = r \,.\, ab$, woraus $cs = r \,.\, ab / \alpha$ oder $= rm / \alpha$, wenn wir die Sehne ab mit m bezeichnen. — A. 172. **Schwerpunkt eines Kreissectors.** Weil ein kleiner Theil bck des Sectors sich als ein Dreieck ansehen läßt, so fällt der Schwerpunkt

Fig. 49.



des Sectors mit dem eines Bogens zusammen, dessen Radius $= {}^2/_3\, r$ ist. Dieser Bogen ist ${}^2/_3\, \alpha$ und seine Sehne ${}^2/_3\, m$; folglich ist die Entfernung des Schwerpunktes $= {}^2/_3 \,.\, rm / \alpha$. Für den Halbkreis ist dies $4r / 3\pi$, für den ganzen $= 0$. — A. 173. **Schwerpunkt eines Segmentes.** Ist der Inhalt des Segmentes $= S$, so findet man durch Benutzung des Bestimmungssatzes und der bekannten Thatsache, daß ein Sector die Summe eines Segmentes und eines Dreiecks ist, den Abstand des Schwerpunktes vom Mittelpunkte $= m^3 / 12\, S$. — A. 174. **Schwerpunkt eines Kugelsectors.** Da man einen Kugelsector in lauter pyramidalische Elemente zerlegen kann, und da der Abstand des Schwerpunktes eines solchen von der C

$= \frac{3}{4} r$ ist, so fällt der Schwerpunkt des Kugelsectors mit dem einer Kugelhaube von $\frac{3}{4}$ Radius zusammen. Ist nun die Höhe der die Grundfläche des Sectors bildenden Haube $= h$, so ist die Höhe dieser Schwerpunktshaube $= \frac{3}{4} h$. Der Schwerpunkt einer Haube liegt aber, wie der jeder Zone, in der Mitte ihrer Höhe, folglich um $\frac{3}{8} h$ von ihrem Scheitel entfernt. Daher ist die gesuchte Entfernung des Schwerpunktes vom Mittelpunkte $= \frac{3}{4} r - \frac{3}{8} h$. Für die Halbkugel wird dies $= \frac{3}{8} r$, für die Kugel $= 0$. — A. 175. **Der Schwerpunkt eines Kugelgewölbes**, dessen Radien R und r sind, ergibt sich nach dem Bestimmungssatze in der Entfernung vom Mittelpunkte $= \frac{3}{8} \cdot \frac{R^4 - r^4}{R^3 - r^3}$. — A. 176. **Schwerpunkt eines Kugelsegmentes.** Entfernung vom Mittelpunkte $= \frac{3}{4} \cdot \frac{(2r - h)^2}{3r - h}$, worin h die Höhe des Segmentes.

Practische Bestimmung. Man hängt einen Körper an einem Faden auf; der Schwerpunkt liegt dann in der Verlängerung des Fadens. Sodann hängt man den Körper in einer zweiten Lage an einem Faden auf, so liegt der Schwerpunkt auch in der Verlängerung dieses Fadens. Wo sich diese Verlängerungen schneiden, ist der Schwerpunkt. — A. 177. Wie groß ist die Kraft P, welche an dem Hebelarme p der Last Q (Hebelarm q) und dem Gewichte G des Hebels das Gleichgewicht hält? Aufl.: Das Gewicht ist eine Kraft, deren Angriffspunkt im Schwerpunkte liegt; dieser hat für eine gleichförmige Stange seine Lage im Mittelpunkte; folglich ist der Hebelarm dieser Kraft des Gewichtes $= \frac{1}{2}(p + q) - q = \frac{1}{2}(p - q)$; hieraus folgt $P = \frac{1}{p}[Qq + \frac{1}{2} G (p - q)]$. — A. 178. $G = 2^{kg}$; $Q = 240^{kg}$; $q = 0{,}02^m$; $p = 0{,}2^m$; wie groß ist die Kraft P? Aufl.: $P = 24{,}9^{kg}$. Ohne das Gewicht wäre $P = 24^{kg}$, also hat das Gewicht des Hebels meist wenig Einfluß. — A. 179. Wie groß ist der Druck auf den Stützpunkt des Hebels? Aufl.: Der Stützpunkt muß der Angriffspunkt der Resultante sein; folglich der Druck $D = P + Q + G$. — A. 180. Was wiegt ein Hebel von 4^m Länge, dessen Gewicht durch 12^{kg}, die in einer Entfernung von 60^{cm} vom Stützpunkte an einem Ende aufgehängt sind, im Gleichgewichte gehalten wird? Aufl.: $0{,}6 \cdot 12 = 1{,}4x$, woraus $x = 5\frac{1}{7}^{kg}$. — A. 181. Ein Sicherheitsventil ist ein einarmiger Hebel (50^{cm} lang), der in der Nähe des Stützpunktes (5^{cm} entfernt) einen die Oeffnung des Dampfkessels verschließenden Kegel und am anderen Ende ein Gewicht trägt; wie groß muß dieses Gewicht sein, wenn die Spannung des Dampfes nicht über 6^{at} (à $1{,}03^{kg}$ auf den qcm) gehen soll, wenn das Ventil selbst $0{,}3^{kg}$ und der Hebel $1{,}2^{kg}$ wiegt, und wenn die Unterfläche des Ventils selbst 3^{qcm} groß ist? Aufl.: $P \cdot 50 + 1{,}2 \cdot 25 + 0{,}3 \cdot 5 = 1{,}03 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 5.$; hieraus $P = 1{,}224^{kg}$.

120 **Die Arten des Gleichgewichtes oder der Ruhe.** Ein Körper ist in Ruhe, wenn sein Schwerpunkt unterstützt ist. Es gibt drei Arten von Ruhe: stabile, labile und indifferente Ruhe. Ein Körper ist in stabiler Ruhe, wenn er nach jeder Veränderung seiner Lage wieder in dieselbe zurückkehrt. Ein Körper ist in labiler Ruhe, wenn er nach einer Veränderung seiner Lage nicht wieder in dieselbe, sondern in eine ganz andere Lage übergeht. Ein Körper ist in indifferenter Ruhe, wenn er in jeder veränderten Lage in Ruhe bleibt. Die drei Arten von Ruhe hängen von der Art der Unterstützung ab. Die Unterstützung kann entweder in einem Punkte, oder in einer Linie oder in einer Fläche stattfinden.

Stabile Ruhe findet statt, wenn Stützpunkt, Stützlinie oder Stützfläche höher liegen als der Schwerpunkt, wenn also der Körper aufgehängt ist; denn alsdann nimmt der Schwerpunkt bei jeder Lagenänderung eine höhere Stelle ein, muß sonach beim Aufhören der Kraftwirkung in die frühere Lage zurückkehren. Eine Münze schwebt stabil auf einer Nadelspitze, wenn auf dieselbe ein Kork mit durchgesteckten Gabeln gesetzt wird, welche den Schwerpunkt unter die Spitze bringen. Die stabile Ruhe dieser Art findet Anwendung bei der Cardanischen oder Schiffslampe; sie hängt in einem Ringe, dessen Achse in einem zweiten Ringe liegt, der ebenfalls um eine wagrechte auf der vorigen senkrecht stehende Achse drehbar ist; das Gewicht der Lampe, welches größtentheils unterhalb der Ringe liegt, dreht bei jeder Schwankung des Schiffes die Ringe der Art, daß die Lampe immer aufrecht hängt. Stabile Ruhe findet auch noch, aber in geringerem Maße statt, wenn die **Stützfläche** tiefer liegt als der Schwerpunkt. Die Stabilität eines so unterstützten Körpers wächst offenbar mit der Arbeit, welche gerade im Stande ist, den Körper umzukanten. Diese Arbeit, also auch die **Stabilität, ist um so größer, je größer das Gewicht des Körpers ist, je tiefer der Schwerpunkt desselben liegt, und je größer seine Grundfläche ist;** denn je tiefer der Schwerpunkt liegt, desto größer ist der Winkel, den der Schwerpunkt zurücklegen muß, um über die Stützkante hinauszukommen, desto größer ist also auch die Arbeit; und je größer die Grundfläche ist,

desto größer ist der Radius des Bogens, den hierbei der Schwerpunkt zurücklegen muß, desto größer ist also auch hier die Arbeit; endlich wächst die Arbeit mit dem zu hebenden Gewichte. Pyramiden besitzen demnach eine große Stabilität. Säulen von Holz fallen leichter um als solche von Stein. Wagen, Kähne u. s. w. schlagen leichter um, wenn sie hoch geladen sind, oder wenn man sich aufrecht in dieselben stellt. Die Fußgestelle hoher Gegenstände werden mit Blei ausgegossen, beim Beladen werden die schwersten Gegenstände zu unterst gelegt. Die Menschen stehen weniger stabil als die Thiere, lernen daher schwerer gehen, müssen sich beim Gehen fortwährend balanciren und fallen beim geringsten Schwanken des Bewußtseins um.

Labile Ruhe findet statt, wenn Stützpunkt oder Stützlinie oder eine sehr kleine Stützfläche tiefer liegen als der Schwerpunkt; denn alsdann nimmt bei jeder Lagenänderung der Schwerpunkt eine tiefere Stellung ein; er kann demnach beim Aufhören der Kraftwirkung nicht in die ursprüngliche höhere Lage zurückkehren, sondern muß in die tiefstmögliche Lage übergehen. Es kann folglich der Körper nur vor dem Fallen geschützt oder balancirt werden, wenn man mit dem Stützpunkte stets wieder unter den ausgewichenen Schwerpunkt zu gelangen sucht. Dieses Balanciren gelingt um so besser, je schwerer der Körper ist, und je höher sein Schwerpunkt liegt; es gelingt auch leichter, wenn der Körper rotirt, weil dann der Schwerpunkt meist eine Fläche beschreibt, welche leichter zu unterfangen ist als ein bloser Punkt, und weil ein rotirender Körper ein gewisses Beharrungsvermögen besitzt. Diese Verhältnisse benutzen Gaukler und Seiltänzer.

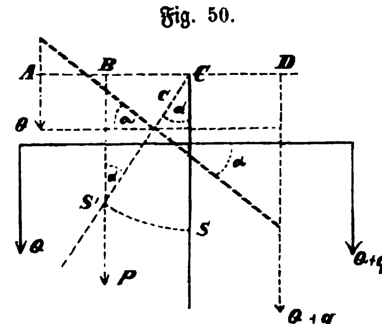
Indifferente Ruhe findet statt, wenn der Schwerpunkt und der Stützpunkt zusammenfallen, wie dies bei den Rädern der Fall ist; oder wenn der Körper eine solche Form hat, daß trotz jeder Drehung der Schwerpunkt immer senkrecht über dem Stützpunkte liegt, wie dies bei Kugeln, bei auf dem Mantel ruhenden Walzen und Kegeln der Fall ist. Die Kraft zur Lagenveränderung ist hier gewöhnlich außerordentlich klein, weil das statische Moment des Körpergewichtes gleich Null ist.

121 **Die Wage.** Das wichtigste Werkzeug für den Physiker, noch mehr aber für den Chemiker ist die Wage; erst durch die Anwendung feiner Wagen ergab sich, daß eine gewisse Stoffmenge oder Masse durch viele Aenderungen hindurch immer genau dieselbe bleibt, daß die chemischen Processe also keine Stoffumwandlungen sind, ein Satz, welcher die Grundwahrheit der Chemie bildet; erst durch genaues Wägen wurde die Verbrennung als eine Verbindung mit Sauerstoff erkannt und hiermit der Chemie durch Lavoisier (1770) eine neue Bahn geöffnet. Mittels der Wage mißt man nicht eigentlich Gewichte, sondern Stoffmengen oder Massen; denn das Gewicht eines Körpers ist veränderlich, ist im Mittelpunkte der Erde und an gewissen Stellen zwischen den Weltkörpern gar nicht vorhanden, hat also keinen wirklichen Bestand; die unveränderlichen Massen dagegen haben reale Existenz. An einem und demselben Orte der Erde verhalten sich nun die Massen (nach 19.) wie die Gewichte; folglich kann man die Massen durch die Gewichte messen und vergleichen. Demnach geben uns die Wagen Aufschluß über die Massen. — Zum Messen nicht zu großer Gewichte dient die Schalenwage oder Krämerwage. Sie ist ein gleicharmiger Hebel, Wagbalken genannt, der an beiden Enden Wagschalen trägt; folglich ist bei der Schalenwage Gleichgewicht, wenn die Meßgewichte dem Gewichte der Last gleich sind. Dieses Gleichgewicht besteht darin, daß der Wagbalken horizontal hängt, was man daran erkennt, daß die auf dem Wagbalken senkrecht stehende Zunge auf eine Marke oder auf den Nullpunkt einer Skale einspielt. Demnach müssen an eine gute Wage folgende drei Anforderungen gestellt werden: 1. Sie muß im unbelasteten oder gleichbelasteten Zustande mit Stabilität wagrecht hängen; dies ist nach 120. der Fall, wenn der Schwerpunkt des Wagbalkens unter dem Stützpunkte liegt. 2. Sie muß richtig sein, d. h. die Meßgewichte müssen wirklich das Gewicht der Last angeben; dies ist der Fall, wenn die 2 Hälften des Wagbalkens gleiche Länge und gleiche statische Momente haben, d. h. sowohl nach Form, als Gewicht einander gleich sind, und wenn auch die 2 Wagschalen mit den Ketten oder Schnüren gleich viel wiegen. 3. Sie muß empfindlich sein, d. h. die Zunge muß schon bei einem sehr kleinen Uebergewichte auf der einen Seite einen großen Ausschlag geben. Man mißt die

Empfindlichkeit durch denjenigen Theil des Gewichtes, welcher noch einen Ausschlag hervorbringt, und verlangt für die physikalischen Wagen eine Empfindlichkeit von $^1/_{60000}$. Die Empfindlichkeit einer Wage ist um so größer, a. je näher der Schwerpunkt dem Stützpunkte liegt. Denn würde der Schwerpunkt in den Stützpunkt fallen, so wäre indifferentes Gleichgewicht, und das geringste Uebergewicht müßte den Wagbalken zum verticalen Umschlagen bringen; eine solche Wage wäre demnach übertrieben empfindlich und würde der ersten Bedingung nicht genügen; liegt aber der Schwerpunkt möglichst nahe unter dem Drehpunkte, so ist die stabile Lage gewahrt und die Empfindlichkeit möglichst groß gemacht, weil dann der Schwerpunkt beim Ausschlagen den kleinsten Bogen beschreibt, und demnach das Uebergewicht die kleinste Arbeit zu vollbringen hat. b. Je länger der Wagbalken ist; denn das den Ausschlag erzeugende Uebergewicht kann um so kräftiger wirken, an je längerem Hebelarme es wirkt. c. Je leichter der Wagbalken und die Wagschalen sind; denn je geringer die Masse ist, welche durch das Uebergewicht bewegt werden soll, desto größer kann der Ausschlagweg sein, den die Masse zurücklegt. d. Je geringer die Widerstände sind. Deßhalb ist bei feinen Wagen die Drehachse von Stahl und ruht mittels einer scharfen Schneide auf Stahl oder Achat, deßhalb sind auch die Aufhängehaken mit stählernen Schneiden versehen; deßhalb wird mittels eines von außen drehbaren Rädchens, das eine Stange und zwei daran befestigte Arme hebt, der Wagbalken nach dem Gebrauche aus seinem Stützpunkte gehoben.

122 Aufg. 182. Die Bedingungen der Empfindlichkeit mathematisch aufzufinden. Aufl.: Es bezeichne P das Gewicht des Wagbalkens, a die halbe Länge desselben, b den Abstand des Schwerpunktes S vom Stützpunkte C (Fig. 50), c den Abstand der Verbindungslinie der beiden Aufhängepunkte von dem Stützpunkte, Q die beiderseits gleiche Last. Wird nun das Uebergewicht q auf die eine Schale gelegt, so nimmt die Zunge CS durch dieses Uebergewicht die Lage CS′ an und legt demnach den Ausschlagwinkel α zurück. Nach dem Hebelgesetze ist dann die Bedingung des Gleichgewichtes $(Q + q)\,CD = Q\,.\,AC + P\,.\,BC$ oder $(Q + q)(a \cos\alpha - c \sin\alpha) = Q(a \cos\alpha + c \sin\alpha) + Pb \sin\alpha$, woraus $\tan\alpha = aq/(bP + c(2Q + q))$. Die Bedingungen, unter welchen dieser Bruch seinen größten Werth erhält, sind auch die Bedingungen der Empfindlichkeit. — A. 183. Wie prüft man die Richtigkeit einer Wage? Antw.: Durch Vertauschung zweier Gleichgewicht herstellenden Massen. — A. 184. Wie kann man mit einer unrichtigen Wage richtig wägen? Antw.: Man tarirt den Körper durch Schrot oder Sand und ersetzt ihn dann durch Gewichte (Bordas Doppelwägung). — A. 185. Auf der Weltausstellung von 1867 hatte Horn aus Berlin eine Wage ausgestellt, die bei 1^{kg} Belastung noch $0{,}1^{mg}$ angab, und Sacré aus Brüssel eine große Präcisionswage für 5^{kg} Belastung, die noch bei $0{,}5^{mg}$ Uebergewicht einen Ausschlag gab. Welches war die Empfindlichkeit dieser Wagen? Aufl.: $^1/_{10000000}$. — A. 186. Wie groß ist die Empfindlichkeit der neuen balance d'essai, die bei 5^{g} Beschwerung noch $0{,}0001^{mg}$ Unterschied angibt, und was ist trotz geringerer Empfindlichkeit an dieser Wage bewundernswerth? — A. 187. Die letzte Genauigkeit erzielte man früher durch einen Reiter aus feinstem Platindraht (nach Berzelius), der auf verschiedene Stellen des graduirten Wagbalkens gesetzt wurde. Auf der Pariser Ausstellung von 1867 hatte statt dessen der Präcisionsbogen (nach Gallois) vielfache Aufnahme gefunden. In der Mitte des Wagbalkens ist ein drehbahres Stäbchen ab (Fig. 51) angebracht, das je nach seiner Stellung einen verschiedenen Gewichtswerth angibt, welcher auf dem Präcisionsbogen cd abzulesen ist. Welchen Vorzug hat diese Einrichtung? Wozu dienen die schweren Eisenplatten, welche jetzt das Fundament der feinen französischen Wagen bilden? — A. 188. Welchen Zweck haben die Schrauben m und n (Fig. 51)? Antw.: m dient zur Veränderung des Schwerpunktes und n zu Correcturen der Länge. Der Lernende suche alle diese Antworten zu begründen.

Fig. 50.



123 Zum raschen Wägen kleiner Lasten dient die Zeigerwage; dieselbe ist ein Winkelhebel, dessen einer Arm die Schale trägt, während der andere ein Gegengewicht bildet und den Zeiger trägt, der auf einer empirisch bestimmten Skale das Gewicht anzeigt. Zum raschen Wägen mittlerer Lasten z. B. im Hausgebrauche dient die Familienwage (s. 25.), wie auch häufig kleinere Federwagen als Briefwagen benutzt werden. Zum raschen Wägen großer Lasten dient die Schnellwage, ein ungleicharmiger eiserner Hebel; an dem kurzen Arme hängt die Last, an dem langen wird ein bekanntes Laufgewicht verschoben. Gleichgewicht findet statt, wenn sich die Entfernung des Laufgewichtes vom Stützpunkte zu derjenigen der Last verhält wie die Last zum Laufgewichte. Hieraus könnte man die Last leicht berechnen; doch steht dieselbe gewöhnlich an den eingekerbten Theilstrichen des Hebels angemerkt. Bequemer und genauer sind die Brückenwagen, von welchen die Decimalwage für größere und die Centesimal- oder Mauthwage für sehr große Lasten benutzt wird. Bei der Decimalwage ruht die Last auf einer Brücke ab (Fig. 52), welche an einem Ende mittels einer Stange an demjenigen Punkte c des Wagbalkens hängt, der dem Stützpunkte 10mal näher ist als die Wagschale, und den wir deßwegen Zehntelspunkt nennen wollen. Mit dem anderen Ende ruht die Brücke auf einem einarmigen Hebel df, welcher mittels einer Stange ebenfalls an den Wagbalken gehängt ist, und zwar an einen solchen Punkt g desselben, daß die beiden Stücke gc und mc dieses Wagbalkenarmes sich gerade so zu einander verhalten, wie die beiden Stücke des Traghebels der Brücke. Hiernach wird die auf der Brücke ruhende Last von den Punkten a und b getragen; der auf a wirkende Lasttheil wirkt direct auf den Zehntelspunkt c; der auf b wirkende Lasttheil wirkt indirect durch die Hebel df und gm auf diesen Punkt, aber in seiner vollen ungeänderten Größe, weil die Theilung dieser 2 Hebel dieselbe ist, und daher dieser Lasttheil durch den einen ebenso viel vergrößert, als durch den anderen verkleinert wird. Folglich ist die ganze Einrichtung gerade so, als ob die ganze Last an dem Zehntelspunkte c hinge; folglich wird dieselbe durch ein Zehntel ihres Gewichtes balancirt.

Fig. 51.

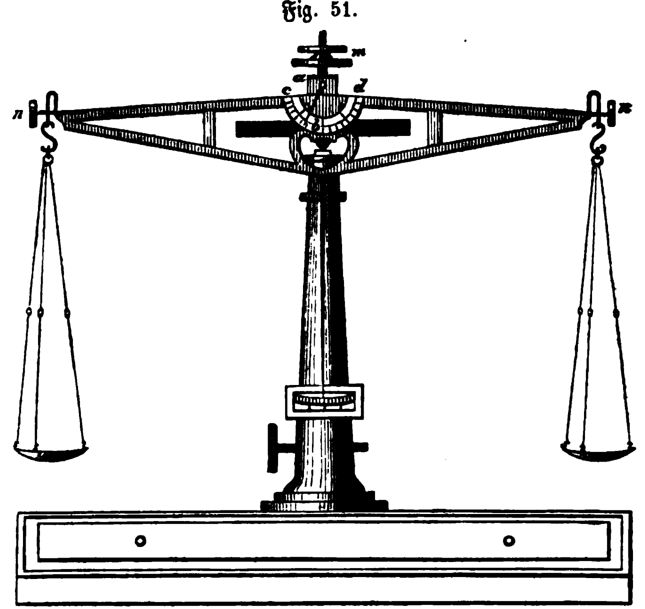
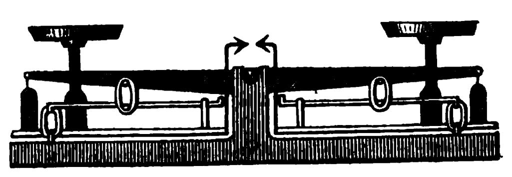


Fig. 52.

Fig. 53.



Zum raschen und bequemen, aber weniger genauen Abwiegen gewöhnlicher Lasten hat

in letzter Zeit die Tafelwage (Fig. 53) viele Verbreitung gefunden. Dieselbe beruht auf dem von Roberval gefundenen statischen Paradoxon, das aber nur ein scheinbares Paradoxon ist, weil die gleichen Lasten zwar scheinbar ungleich weit vom Stützpunkte entfernt sein können, in Wirklichkeit aber auf gleich weit entfernte Punkte wirken.

3. Specielle Bewegungen.

a. Die fortschreitende Bewegung.

124 **1. Der Stoß** (Wren 1669). Eine geradlinig fortschreitende Bewegung entsteht durch die Wirkung einer einzigen, sowohl einer momentanen, als auch einer continuirlichen Kraft auf einen freien Körper. Die Einwirkung einer momentanen Kraft nennt man Stoß; die durch denselben erzeugte Bewegung ist gleichförmig. Von besonderem Interesse ist der Fall, den man vorzugsweise im gewöhnlichen Leben mit Stoß bezeichnet, daß ein bewegter Körper mit einem anderen zusammentrifft, den wir uns der größeren Allgemeinheit wegen ebenfalls bewegt denken wollen. Die Stoßwirkung hängt dann ab: 1. von der Masse (m und m′) der beiden Körper; 2. von der Geschwindigkeit derselben (c und c′); 3. von der Gestalt der Körper, die wir uns der Einfachheit wegen als Kugel denken; 4. von der Bewegungsrichtung der beiden Körper; 5. von der Stoßrichtung. Die Stoßrichtung ist die Gerade, welche auf dem ebenen Flächenelement senkrecht steht, in welchem sich die Körper berühren, und welche durch den Berührungspunkt geht. Hierdurch unterscheidet man den centralen Stoß und den excentrischen Stoß; bei dem ersteren geht die Stoßrichtung durch die Schwerpunkte der beiden Körper, bei dem letzteren nicht. Der Stoß zweier Kugeln ist demnach stets central. Dann unterscheidet man den geraden Stoß und den schiefen Stoß; bei dem ersteren fällt die Stoßrichtung mit der Bewegungsrichtung zusammen, bei dem letzteren nicht. Endlich hängt die Stoßwirkung noch 6. ab von der Elasticität der Körper. Es gibt zwar weder vollkommen unelastische, noch über jede Grenze hinaus vollkommen elastische Körper; doch läßt sich gerade für diese zwei äußersten, nur gedachten Fälle die Stoßerscheinung leichter untersuchen; die Fälle der Wirklichkeit sind Annäherungen an die für die gedachten Fälle erhaltenen Resultate.

125 **Gesetze des Stoßes unelastischer Körper.** Obwohl die Gesetze des Stoßes sich ebenso wie z. B. die der Wage auf dem Wege logischer Folgerung gewinnen lassen, so wollen wir dieselben doch auf rein mathematischem Wege ableiten, weil diese Methode beim Stoße besonders lehrreich ist. Zunächst mögen zwei unelastische Körper in geradem und centralem Stoße auf einander treffen. Es kann alsdann weder eine drehende, noch eine seitlich ausweichende Bewegung entstehen; vielmehr müssen die beiden Körper in einer Richtung und mit einer und derselben Geschwindigkeit weiter gehen. Denn der schnellere Körper theilt den nächsten Theilchen des anderen Körpers etwas von seiner Bewegung mit, so daß er selbst etwas langsamer gehen muß, der getroffene aber an der Berührungsstelle etwas platt gedrückt wird. Die Bewegung dieser eingedrückten Theilchen pflanzt sich allmälig auf die entfernteren Theilchen des gestoßenen Körpers und dadurch auf den Körper fort. Dies setzt sich so lange fort, bis beide Körper gleiche Geschwindigkeiten haben, weil dann der Grund für die Mittheilung der Bewegung wegfällt. Man könnte nun auf den Gedanken kommen, die Theorie des Stoßes darauf zu gründen, daß die lebendige Kraft vor dem Stoße nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft gleich der lebendigen Kraft nach dem Stoße sein müsse; das Princip findet auch hier jedenfalls statt; nur ist bei dem Stoße von nicht vollkommen elastischen Körpern zu beachten, daß bei dem Plattdrücken eine Lagenänderung der Moleküle stattfindet, also ein Theil der lebendigen Kraft in Spannkraft umgesetzt wird, und

daß diese Formänderung nicht ohne eine Verstärkung der molekularen Schwingungen, ohne eine Temperaturerhöhung, geschehen kann, daß also jedenfalls ein Theil der lebendigen Kraft nicht am Stoße betheiligt ist. Hiernach kann die lebendige Kraft nicht für die Erforschung des Stoßes benutzt werden, wohl aber der von derselben ausgeübte Druck; denn während des Stoßes ist nach dem fünften Axiom der zwischen beiden Körpern stattfindende Druck nach beiden Seiten gleich groß; folglich hängt die Geschwindigkeitsänderung der Körper nur von der Masse derselben ab; die größere Masse muß die kleinere Aenderung und die kleinere Masse die größere Aenderung erfahren, weil bei gleichen Kräften (nach 19.) die erzeugten Geschwindigkeiten sich umgekehrt wie die Massen verhalten. Ist nun die unbekannte gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoße $= x$, so ist der Verlust der schnelleren Kugel $c - x$ und der Gewinn der langsameren $x - c'$; daher entsteht die Proportion $m : m' = (x - c') : (c - x)$, woraus sich ergibt

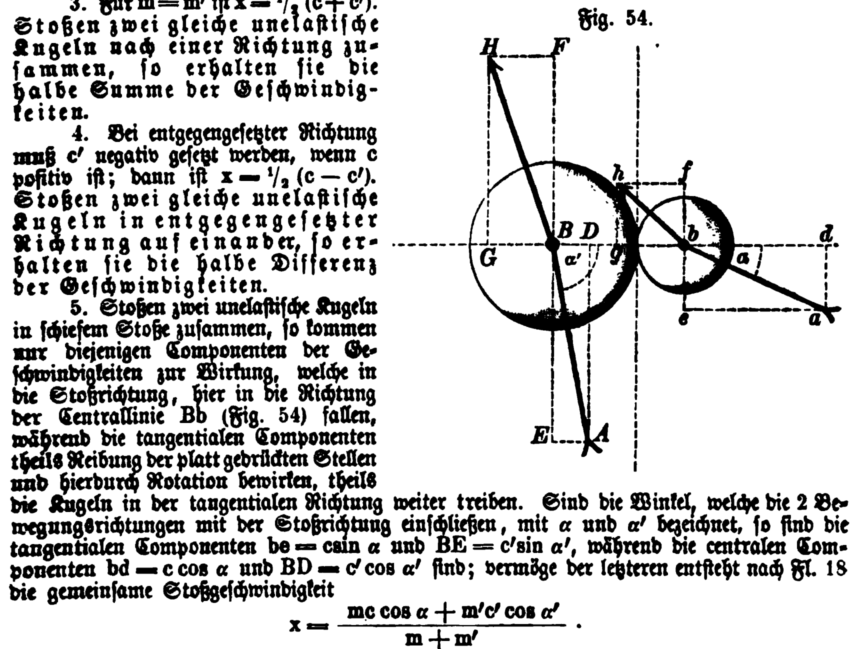
$$x = \frac{mc + m'c'}{m + m'} \quad . . (18)$$

Discussion dieser Formel. 1. Ist der gestoßene Körper in Ruhe, also $c' = 0$, so fällt das Glied $m'c'$ weg; wenn nun gegen eine feste Wand gestoßen wird, so ist m' gegen m unendlich, also $x = mc / \infty = 0$. Stößt ein unelastischer Körper gegen eine feste Wand, so ruht er nach dem Stoße.

2. Ist die gestoßene ruhende Kugel $m' = m$, so ist $x = \frac{1}{2} c$. Stößt eine unelastische Kugel gegen eine ruhende von gleicher Größe, so gehen beide mit der halben Geschwindigkeit der stoßenden weiter.

3. Für $m = m'$ ist $x = \frac{1}{2}(c + c')$. Stoßen zwei gleiche unelastische Kugeln nach einer Richtung zusammen, so erhalten sie die halbe Summe der Geschwindigkeiten.

Fig. 54.



4. Bei entgegengesetzter Richtung muß c' negativ gesetzt werden, wenn c positiv ist; dann ist $x = \frac{1}{2}(c - c')$. Stoßen zwei gleiche unelastische Kugeln in entgegengesetzter Richtung auf einander, so erhalten sie die halbe Differenz der Geschwindigkeiten.

5. Stoßen zwei unelastische Kugeln in schiefem Stoße zusammen, so kommen nur diejenigen Componenten der Geschwindigkeiten zur Wirkung, welche in die Stoßrichtung, hier in die Richtung der Centrallinie Bb (Fig. 54) fallen, während die tangentialen Componenten theils Reibung der platt gedrückten Stellen und hierdurch Rotation bewirken, theils die Kugeln in der tangentialen Richtung weiter treiben. Sind die Winkel, welche die 2 Bewegungsrichtungen mit der Stoßrichtung einschließen, mit α und α' bezeichnet, so sind die tangentialen Componenten $be = c \sin \alpha$ und $BE = c' \sin \alpha'$, während die centralen Componenten $bd = c \cos \alpha$ und $BD = c' \cos \alpha'$ sind; vermöge der letzteren entsteht nach Fl. 18 die gemeinsame Stoßgeschwindigkeit

$$x = \frac{mc \cos \alpha + m'c' \cos \alpha'}{m + m'} .$$

Mit dieser componirt sich nach dem Stoße in der Kugel m die tangentiale Geschwindigkeit $bf = c \sin \alpha$ zu der Geschwindigkeit bh, ebenso wie in der Kugel m' durch Vereinigung der gemeinsamen centralen Geschw. x mit der tangentialen BF die Geschw. BH entsteht, welche leicht nach dem Parallelogramm der Kräfte zu berechnen sind.

Aufg. 189. Wie erklärt sich der scheinbare Widerspruch in dem ersten Satze mit dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft? — A. 190. Wie groß ist der Verlust an lebendiger Kraft, der bei dem Stoße unelastischer Körper durch die bleibende Zusammendrückung derselben und die Fortpflanzung der Erschütterungen in die Erde stattfindet. Aufl.: Vor dem

Stoße ist die lebendige Kraft = $^1/_2\, mc^2 + {}^1/_2\, m'c'^2$, nach dem Stoße = $^1/_2\,(m + m')x^2$; daher der Verlust = $^1/_2\, mc^2 + {}^1/_2\, m'c'^2 - {}^1/_2\,(m + m')x^2$. Durch Substitution des Werthes für x wird derselbe = $mm'\,(c - c')^2 / 2\,(m + m')$. — A. 191. Zwei Körper von 100g und 200g stoßen mit 50 und 20cm Geschw. auf einander; welches ist ihre gemeinsame Geschw. nach dem Stoße? Aufl.: $x = 30^{cm}$.

126 **Gesetze des Stoßes elastischer Körper.** Auch hier betrachten wir zuerst den geraden, centralen Stoß. Der treffende Körper verliert, weil er den nächsten Theil des getroffenen Körpers eindrückt, von seiner Geschwindigkeit den Betrag $c - x$; da aber diese eingedrückten Theilchen mit derselben Kraft zurückkehren, wenn der Körper vollkommen elastisch ist, so üben sie denselben Rückstoß aus, der auf sie ausgeübt wurde, so daß der treffende Körper dieselbe Geschwindigkeit noch einmal verliert; folglich ist seine Geschwindigkeit nach dem Stoße $v = c - 2\,(c - x) = 2x - c$. Ganz ebenso ergibt sich für den getroffenen Körper $v' = c' + 2\,(x - c') = 2x - c'$. Setzen wir den Werth für x aus Formel (18) hier ein, so erhalten wir

$$v = \frac{(m - m')\,c + 2m'c'}{m + m'} \quad \text{und} \quad v' = \frac{(m' - m)\,c' + 2mc}{m + m'}$$

Discussion dieser Formeln. 1. Ist der gestoßene Körper in Ruhe, also $c' = 0$, und ist $m' = \infty$, so ergibt sich $v' = 0$ und $v = -c$. Stößt eine elastische Kugel in geradem Stoße gegen eine elastische Wand, so kehrt sie mit derselben Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zurück.

2. Ist die gestoßene Kugel $m' = m$ und in Ruhe, so ergibt sich $v = 0$ und $v' = c$. Stößt eine elastische Kugel in geradem Stoße gegen eine gleiche ruhende, so ruht die stoßende, und die gestoßene geht mit der Geschwindigkeit der stoßenden weiter.

3. Für $m = m'$ und einen positiven Werth beider Geschwindigkeiten ergibt sich $v = c'$ und $v' = c$. Ebenso ergibt sich, wenn c negativ ist, $v = -c'$ und $v' = c$. Stoßen also zwei gleiche elastische Kugeln in geradem Stoße in derselben oder in entgegengesetzter Richtung auf einander, so gehen sie mit vertauschten Geschwindigkeiten weiter.

4. Stößt eine elastische Kugel gegen eine Reihe von elastischen Kugeln, so ruhen alle, nur die letzte geht mit der Geschwindigkeit der stoßenden weiter. Dies folgt einfach aus Nro. 2. Ebenso gehen die 2, 3 u. s. w. letzten Kugeln weiter, wenn 2, 3 u. s. w. Kugeln gegen das erste Ende stoßen.

5. Stößt eine elastische Kugel gegen eine elastische Wand in schiefem Stoße, so geht sie nach der entgegengesetzten Seite unter demselben Winkel mit derselben Geschwindigkeit zurück.

Beweis. Die Geschw. ab (Fig. 55) kann man nach dem Parallelogramm der Kräfte in zwei Geschw. zerlegen, cb in der Richtung der Wand und db senkrecht zu derselben. Vermöge der letzteren würde die Kugel in derselben Zeit den Weg bd (nach Nro. 1) zurück durchlaufen, in welcher sie vermöge der ersteren den Weg bf = cb machen würde. Da die wirkliche Bewegung der Kugel sich aus diesen beiden Bewegungen zusammensetzt, so muß die Kugel den Weg bg einschlagen, für welchen bg = ba und $\measuredangle$ fbg = $\measuredangle$ cba ist.

6. Bei dem schiefen Stoße zweier elastischen Kugeln gilt für die centrale Componente die Formel für die gemeinsame Stoßgeschw. x in 5. des ersten Falles, jedoch nur für das erste Zusammentreffen; durch die Rückkehr der plattgedrückten Stellen wird aber nach dem Eingange dieses Abschnittes die centrale Geschw. der ersten Kugel $2x - c \cos\alpha$, welche sich mit der tangentialen Geschw. $c \sin\alpha$ zu der Geschw. nach dem Stoße componirt. Ebenso entsteht die Geschw. der zweiten Kugel als Resultante der centralen Geschw. $2x - c' \cos\alpha'$ und der tangentialen $c' \sin\alpha'$.

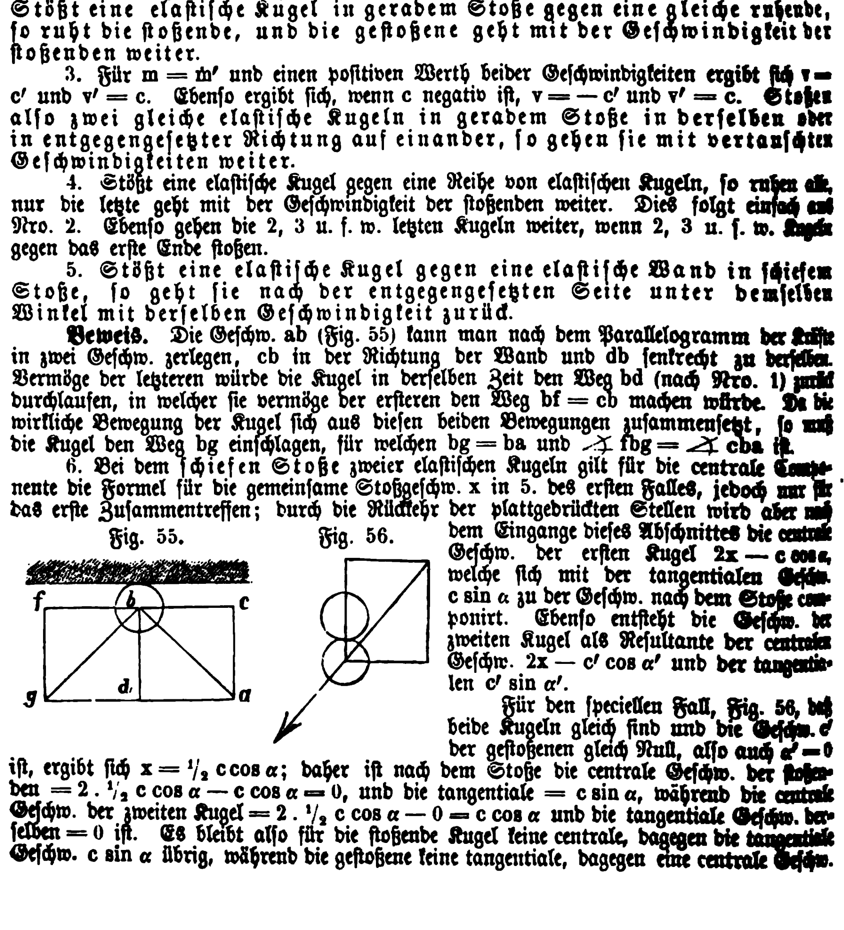


Fig. 55. Fig. 56.

Für den speciellen Fall, Fig. 56, daß beide Kugeln gleich sind und die Geschw. c' der gestoßenen gleich Null, also auch $\alpha' = 0$ ist, ergibt sich $x = {}^1/_2\, c \cos\alpha$; daher ist nach dem Stoße die centrale Geschw. der stoßenden $= 2 \,.\, {}^1/_2\, c \cos\alpha - c \cos\alpha = 0$, und die tangentiale $= c \sin\alpha$, während die centrale Geschw. der zweiten Kugel $= 2 \,.\, {}^1/_2\, c \cos\alpha - 0 = c \cos\alpha$ und die tangentiale Geschw. derselben = 0 ist. Es bleibt also für die stoßende Kugel keine centrale, dagegen die tangentiale Geschw. $c \sin\alpha$ übrig, während die gestoßene keine tangentiale, dagegen eine centrale Geschw.

$c \cos \alpha$ besitzt. Die Zerlegung der Geschw. ist demzufolge einfach durch Fig. 56 dargestellt. Wenn von zwei gleichen Kugeln die eine in Ruhe ist und von der anderen in schiefem Stoße getroffen wird, so geht die erstere in der Richtung der Centrallinie, die letztere in der dazu senkrechten Richtung weiter. Die Richtung der ersteren ist im Billardspiel beim Schneiden, die der letzteren beim Caramboliren ins Auge zu fassen.

Auch das Gesetz 5. geht als einfache Folgerung aus 6. hervor, und hat ebenfalls im Billardspiel seine Verwendung.

7. Durch die verschiedene tangentiale Geschw. tritt beim schiefen Stoße Reibung auf, welche die Kugeln in Rotation versetzt; dieselbe Bewegung entsteht auch, wenn man eine Billardkugel mit dem Queue in schiefem Stoße, also oben oder unten, links oder rechts von dem nächsten Punkte trifft. In diesem Falle wirkt die Reibung der Kugel auf der Unterlage wesentlich ändernd ein; sie bringt nämlich durch die Rotation der Kugel eine zweite fortschreitende Bewegung neben der durch den Stoß erzeugten hervor. Wird die Kugel oben getroffen, so sind die zwei fortschreitenden Bewegungen von gleicher Richtung, daher läuft die Kugel lange fort, selbst noch, wenn sie eine zweite getroffen hat. Wird aber die Kugel unten getroffen, so ist die zweite fortschreitende Bewegung von entgegengesetzter Richtung zu der ersten, so daß eine solche Kugel stehen bleiben oder gar zurückrollen kann, wenn ihre fortschreitende Bewegung durch Reibung oder einen Rückstoß aufgehoben wird. (Klappstöße.) Ebenso kann eine Kugel von einer anderen unter den verschiedensten Winkeln abprallen, je nachdem ihre rotirende Bewegung durch Treffen auf der einen oder anderen Seite eine verschiedene Richtung und Stärke hat. (Caramboliren.) Ueberhaupt bietet das Billardspiel die mannigfaltigsten und überraschendsten Stoßprobleme und eignet sich gut zur Einsicht in die 3 letzten Gesetze; die 4 ersten zeigt man experimentell mit der Percussionsmaschine von Mariotte und Nollet.

Aufg. 192. Wie groß ist der Verlust an lebendiger Kraft bei dem Stoße elastischer Körper? And.: $\frac{1}{2}(mc^2 + m'c'^2 - mv^2 - m'v'^2)$. Substituirt man hierin die Werthe von v und v', so ergibt sich der Verlust $= 0$. Dieses ist nur dadurch möglich, daß die Erschütterungen der Theilchen ganz zu den Rückstößen verwendet werden, sich also nicht auf benachbarte Körper fortpflanzen; es geht daher auch von der Stoßkraft nichts verloren. Man macht hiervon Anwendung, um die schädliche Wirkung von Stößen zu vermindern. Die Wägen hängt man in Federn, um die Stöße zu mildern, und um dadurch sowohl den Bau leichter machen, als auch länger erhalten zu können, sowie um an Zugkraft zu sparen. Die Ambose großer Hämmer erhalten ein elastisches Fundament aus eichenen Balken. Der Stoß hat auch viele nützliche Anwendungen: das Eintreiben von Nägeln, das Einrammen der Pfähle, das Sprengen von Steinen durch Eisenkeile und durch Pulver; das Bearbeiten von Holz, Steinen, Eisen und anderer Metalle durch Meißel, Feile, Hämmer u. s. w. beruht auf der Wirkung des Stoßes. — A. 193. Wie groß ist die Geschwindigkeit der 2 Körper in A. 191, wenn sie elastisch sind? Aufl.: $v = 10^{cm}$ und $v' = 40^{cm}$.

127

2. Der freie Fall. Unter dem freien Falle versteht man die fortschreitende Bewegung eines nicht unterstützten Körpers gegen den Mittelpunkt der Erde hin, hervorgebracht durch die Anziehung der Erde. Um die Gesetze dieser Wirkung in aller Reinheit zu erkennen, müssen wir von Nebenumständen absehen, wie z. B. von dem Widerstande der Luft; ebenso abstrahiren wir von der allmäligen Zunahme der Schwerkraft eines Körpers, wenn derselbe dem Mittelpunkte der Erde durch den Fall näher kommt; denn diese Zunahme ist für die auf der Oberfläche der Erde stattfindenden Fallerscheinungen unmeßbar klein und daher auf die Gesetze derselben ohne Einfluß. — Der freie Fall ist eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; denn die Erde übt nach unserer Voraussetzung in jedem unendlich klein gedachten Zeittheilchen stets denselben Einfluß auf den Körper aus, sie muß daher dem Körper in jedem Zeittheilchen dieselbe Geschwindigkeit ertheilen; diese muß er dann nach dem Gesetze der Trägheit beibehalten, um in dem folgenden Zeittheilchen dieselbe Geschwindigkeit ebenfalls zu erhalten und die Geschwindigkeit daher ganz gleichmäßig zu vergrößern. In solcher Weise erhält ein frei fallender Körper in jeder Secunde eine Geschwindigkeit von $9{,}808^{m}$ oder ca. 10^{m}. Diese ganz allgemein mit g bezeichnete Geschwindigkeit nennt man die Beschleunigung oder Acceleration der Schwere, weil ein fallender Körper sie durch die Schwerkraft in jeder Secunde erhält und dadurch seine Geschwindigkeit in jeder Secunde um g vergrößert. Am genauesten wird diese Größe durch Pendelversuche gefunden. Es wurde schon früher erwähnt, daß sie das Maß der Anziehung der Erde oder der Schwerkraft ist

Fallgesetze. (Galilei 1602). Die Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung, die wir schon in 16. abgeleitet haben, sind auch die Gesetze des freien Falles. Da indessen der freie Fall eine wichtige Erscheinung ist, so werden sie für denselben speciell ausgesprochen, abgeleitet und nachgewiesen.

1. Die Geschwindigkeiten eines frei fallenden Körpers verhalten sich wie die Fallzeiten, oder $v = gt$ . . . . (2)

Die Erde ertheilt einem fallenden Körper in der ersten Sec. die Geschw. g; diese muß er nach dem Gesetze der Trägheit in der 2. Sec. beibehalten; in dieser erhält er aber gleichfalls die Geschw. g; folglich hat er am Ende der 2ten Sec. die Gesch. 2g. Diese muß er nach dem Gesetze der Trägheit in der 3ten Secunde beibehalten; in dieser erhält er aber gleichfalls die Geschw. g; folglich hat er am Ende der 3ten Sec. die Geschw. 3 g u. s. w., am Ende der 4ten Sec. die Geschw. 4g u. s. w., am Ende der t ten Sec. die Geschw. tg, also $v = gt$. Nach dieser Formel berechnet man die Geschw. eines frei fallenden Körpers in Metern, indem man die Secundenzahl mit 10 oder genauer mit 9,808 multiplicirt.

2. Der Weg in der ersten Secunde ist halb so groß als die Endgeschwindigkeit der ersten Secunde, also $= \frac{1}{2} g = 5^m$.

Am Anfange der 1. Secunde hat der Körper die Geschw. 0, am Ende derselben die Geschw. g, also ist die Mittelgeschwindigkeit $= \frac{1}{2} (0 + g) = \frac{1}{2} g$. Es wird (nach 15. a) in Wirklichkeit derselbe Weg zurückgelegt, der bei gleichförmiger Bewegung in 1 Sec. mit der constanten Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}g$ zurückgelegt würde, also ist der Weg $= \frac{1}{2} g$.

3. Die Wege in den auf einander folgenden Secunden verhalten sich wie die ungraden Zahlen; sie sind: in der 1sten Secunde $= 1 . g/2 = 1 . 5^m$, in der 2ten $= 3 . g/2 = 3 . 5^m$, in der 3ten $= 5 . g/2 = 5 . 5^m$, in der 4ten $= 7 . g/2 = 7 . 5^m$ u. s. w., in der nten $(2n-1) g/2$.

Die Geschw. am Anfange der 2. Sec. $= g$, am Ende derselben $= 2g$; folglich ist die Mittelgeschw $= \frac{1}{2} (g + 2g) = 3 . g/2$; daher ist der Weg in der zweiten Secunde $= 3 . g/2$ u. s. w. Die nte ungerade Zahl ist $(2n-1)$.

4. Die Fallräume in den ganzen Fallzeiten verhalten sich wie die Quadrate der Fallzeiten, sie sind $1 . g/2 = 1 . 5^m$, $4 . g/2 = 4 . 5^m$, $9 . g/2 = 9 . 5^m$, $16 . g/2 = 16 . 5^m$ u. s. w., überhaupt $s = t^2 . g/2 = \frac{1}{2} gt^2$ . . (3)

Durch Addition der Einzelwege aus 3. ergibt sich für 2 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 = 4 . g/2$; für 3 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 + 5 . g/2 = 9 . g/2 = 9 . 5^m$; für 4 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 + 5 . g/2 + 7 . g/2 = 16 . g/2 = 16 . 5^m$ u. s. w. Allgemein: Die Geschw. am Anfange der 1 Sec. ist $= 0$, am Ende der t ten Sec. $= gt$; daher ist die Mittelgeschw. $= \frac{1}{2} (0 + gt) = \frac{1}{2} gt$; folglich ist der Weg in t Sec. $s = \frac{1}{2} gt . t = \frac{1}{2} gt^2$. Nach dieser, der Hauptformel des freien Falles, berechnet man insbesondere den Raum in Metern, den jeder frei fallende Körper in beliebiger Zeit zurücklegt, indem man die Zahl der Secunden ins Quadrat erhebt und dieses Quadrat mit 5, genauer mit 4,904 multiplicirt.

5. Die Fallräume verhalten sich wie die Quadrate der Endgeschwindigkeiten, oder $s = v^2 / 2g$ . . . . (4)

Das Gesetz ist eine Verbindung der Gesetze 4 und 1; wenn sich nach 4 die Fallräume wie die Quadrate der Fallzeiten, und wenn nach 1 diese sich wie die Geschwindigkeiten verhalten, so müssen die Fallräume auch den Quadraten der Endgeschwindigkeiten proportional sein. Auch die Formel (4) ist eine Verbindung von (2) und (3); denn aus der ersten ergibt sich $t = v / g$, und durch Substitution dieses Werthes in die zweite findet man $s = v^2 / 2g$. Mittels dieser Formel findet man die Höhe s, welche ein Körper durchfallen muß, um die Geschw. v zu erreichen; daher wird der Ausdruck $v^2/2g$ auch Geschwindigkeitshöhe genannt.

6. Die Fallzeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen, oder $t = \sqrt{(2s / g)}$ . . . . (19)

Dieser Satz ist eine Umkehrung von 4; auch folgt die Fl. (19) aus (3), wenn man aus derselben t sucht.

7. Die Geschwindigkeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen, oder $v = \sqrt{(2gs)}$ . . . . (4)

Das Gesetz ist eine Verbindung von 6 und 1, und die wichtige Formel ist nur eine Umkehrung von (4), deßhalb mit derselben Nummer bezeichnet. Nach dieser Formel berechnet sich leicht die Geschw., die ein fallender Körper am Fuße der durchfallenen Höhe s besitzt; sie findet besondere Anwendung in den Lehren vom Pendel und von der Bewegung der Flüssigkeiten.

Nachweise für diese Gesetze sind mehrfach an hohen Thürmen oder tiefen Schachten geführt worden z. B. von Benzenberg (1802) am Michaelisthurme in Hamburg und von Reich (1832) in einem Bergschachte bei Freiberg. Indessen sind derartige Nachweise doch sehr beschränkt, da ein frei fallender Körper schon in 5 Sec. eine Höhe von 125m, wie sie sich selten an Thürmen findet, durchläuft. Um experimentelle, überall mögliche Nachweise zu führen, handelt es sich darum, die Bewegung in einer solchen Weise zu verlangsamen, daß die Gesetze unverändert bleiben. Dies kann nach 2 Methoden geschehen: 1. Durch Verringerung der Kraft bei unveränderter Masse; 2. durch Vergrößerung der Masse bei gleichbleibender Kraft; nach beiden Methoden wird die Geschw. kleiner, durch erstere, weil nach 19. und 23. bei gleichen Massen die Geschw. sich wie die Kräfte verhalten, und nach der zweiten, weil bei gleichen Kräften sich die Geschw. umgekehrt wie die Massen verhalten. Der erste Gedanke wurde schon von Galilei verwirklicht, der die Fallgesetze auffand, indem er Kugeln auf schiefen Ebenen herabrollen ließ. Die Kraft, mit welcher ein Körper vom Gewichte p auf einer schiefen Ebene herabrollt, ist bekanntlich (nach 103.) nicht p, sondern $p \sin \alpha$; folglich ist nach dem angegebenen Satze die Acceleration nicht g, sondern $g \sin \alpha$, kann also durch Verkleinerung von α auf jeden beliebigen Grad der Kleinheit gebracht werden. In den Formeln des freien Falles ändert sich für die schiefe Ebene nichts als g; hierdurch werden die Verhältnisse einzelner Werthe nicht geändert, die Gesetze also aufrecht erhalten. Der zweite Gedanke ist in Atwoods Fallmaschine (1781) verwirklicht (Fig. 2. S. 33), in welcher ein kleines fallendes Gewicht, etwa von 1g, noch einen Ballast, z. B. die Masse von 200g, im Ganzen also die Masse von 201g zu bewegen hat, wodurch die Acceleration nicht = 10m, sondern = 10 / 201 = 5cm wird. Der Weg in der ersten Sec. beträgt dann nur 2,5cm oder 1″ hessisch. Hat man demnach eine Seitenfläche des Gestelles in hessische Zolle eingetheilt und an demselben eine verschiebbare Grundplatte K angebracht, die man nach und nach in Entfernungen von 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81″ von dem hinaufgezogenen größeren Gewichte befestigt, und läßt man dieses mit einem Secundenschlage los, so schlägt es in 1, 2, 3 . . . . 9 Sec. auf die Grundplatte K auf, womit das Hauptgesetz No. 4 und damit auch alle übrigen Gesetze, sowie die Größe der Acceleration = 10m nachgewiesen sind. Von besonderem Interesse ist es indeß, das Gesetz 1. speciell nachzuweisen; zu dem Ende erhält das Uebergewicht die Form eines größeren Ringes oder eines längeren Stäbchens, wie es (Fig. 2) in der Nebenfigur bei H sichtbar ist. Außerdem wird in Entfernungen von 1, 4, 9″ . . . eine durchbrochene Platte angeschraubt, welche das Uebergewicht nach 1, 2, 3 . . . Sec. abnimmt, so daß nach diesen Zeiten die Gewichte sich nur durch ihre lebendige Kraft weiter bewegen; man findet dann, daß die Gewichte nach diesen Zeiten in jeder Sec. bezüglich 5, 10, 15cm . . . . zurücklegen, womit das erste Gesetz und abermals die Acceleration = 10m nachgewiesen ist. Bei vollkommeneren Apparaten ist ein Secunden schlagendes Pendel so angebracht, daß mit der Auslösung des größeren Gewichtes die Pendelschwingungen und die Bewegungen des Secundenzeigers beginnen.

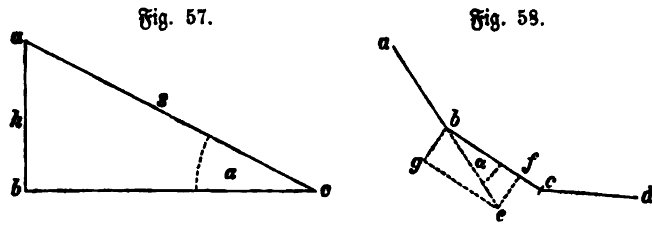
Fall auf der schiefen Ebene. Da die Acceleration auf der schiefen Ebene **128** $= g \sin \alpha$ ist, so sind die Formeln für diese Fallbewegung

$$v = gt \sin \alpha,\ s = {}^1\!/_2 gt^2 \sin \alpha,\ s = v^2 / 2g \sin \alpha,\ v = \sqrt{2gs \sin \alpha}\ .\ . \quad (20)$$

Außer den Gesetzen des freien Falles bestehen für die Fallbewegung auf der schiefen Ebene im Verhältnisse zum freien Falle einige interessante Beziehungen, die sich aus diesen Formeln ergeben:

Da nämlich (Fig. 57) $s \sin \alpha = h$, so läßt sich die letzte Formel (20) auch in der Gestalt $v = \sqrt{(2gh)}$ schreiben; dieser Ausdruck $\sqrt{(2gh)}$ gibt aber nach (4) die Geschw. an,

Fig. 57. Fig. 58.

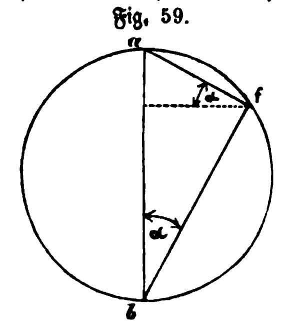


die ein Körper erreicht, wenn er die Höhe h frei durchfällt; folglich ist die Endgeschw. in beiden Fällen gleich groß. Die Endgeschw. eines fallenden Körpers ist dieselbe, wenn er eine und dieselbe Höhe frei oder auf einer beliebig geneigten Ebene durchfallen hat. Geht der Körper jedoch von einer schiefen Ebene auf eine andere über, so erleidet er an jedem Uebergange einen Verlust an Geschw. Denn ist (Fig. 59)

seine Geschw. v in der Richtung abe im Punkte b = be, so legt er nach dem Parallelogramm der Kräfte in der folgenden Secunde wirklich nur den Weg bf = be cos α zurück, verliert also an Geschw. den Betrag $v - v \cos \alpha = v(1 - \cos \alpha) = 2v \sin^2 \alpha/_2$.° Dieser Verlust ist = Null, wenn $\alpha = 0$, wenn also die gebrochene Linie abcd in eine gerade übergeht; er ist verschwindend klein, wenn α verschwindend klein ist, d. h. wenn sich der Körper auf einer concaven krummen Linie bewegt, da in einer solchen die Richtungsänderung an jeder Stelle verschwindend klein ist; demnach ist die Geschw. auch am Fuße einer concaven krummen Fläche dieselbe wie am Fuße einer schiefen Ebene von gleicher Höhe und wie am Fuße der senkrechten Höhe selbst.

Ist die Anfangsgeschw. am Gipfel der schiefen Ebene = 0 und die Endgeschw. am Fuße von s oder h (Fig. 57) = v, so ist die Mittelgeschw. in beiden Fällen = $^1/_2$ v. Da bei gleichen Geschw. sich die Zeiten zweier Bewegungen wie die durchlaufenen Wege verhalten, so ergibt sich der Satz: *die zum freien Durchfallen der Höhe und die zum Durchlaufen der Länge einer schiefen Ebene erforderlichen Zeiten verhalten sich wie die Höhe zur Länge.* Der Körper kommt also am Fuße von s zwar mit derselben Geschw., aber viel später an als am Fuße von h. Hierdurch wird die Frage nahe gelegt, ob es kein Mittel gäbe, den Weg von a bis c in kürzerer Zeit zurückzulegen, als es auf der geraden Bahn ac geschieht. Solche Mittel sind verschiedene concave Bahnen; so wird schon ein Kreisbogen zwischen a und c in kürzerer Zeit durchfallen als die Gerade; in kürzester Zeit gelangt jedoch ein Körper von a nach c, wenn zwischen beiden Stellen eine Bahn von der Form der Radlinie oder *Cycloide* angebracht ist, einer Linie, welche ein Punkt eines auf ebener Bahn fortrollenden Rades im Raume beschreibt. Die Cycloide ist demnach die Linie der kürzesten Fallzeit, *Brachystochrone*; sie ist aber auch die Linie gleicher Fallzeit, *Tautochrone*, weil die Fallzeit dieselbe bleibt, ob der Körper seine Bewegung am höchsten Punkte oder an irgend einem anderen Punkte der Cycloide beginnt. Die Beweise für diese Sätze von Bernoulli und Huyghens sind hier nicht möglich. — Eine interessante Eigenschaft hinsichtlich der Fallzeit haben die Sehnen eines Kreises; es werden nämlich *die von dem höchsten und vom tiefsten Punkte ausgehenden Sehnen eines Kreises in derselben Zeit durchfallen wie der senkrechte Durchmesser.* Fällt ein Körper (Fig. 59) den Durchmesser ab = d herab, so ist $d = {}^1/_2 gt^2$, woraus $t = \sqrt{(2d/g)}$; fällt er durch die Sehne af, so ist $af = {}^1/_2 gt^2 \sin \alpha$, also $t = \sqrt{(2af/g \sin \alpha)}$; da nun $af/\sin \alpha = ab = d$, so ist auch hier $t = \sqrt{(2d/g)}$; fällt endlich der Körper durch fb, so ist $fb = {}^1/_2 gt^2 \cos \alpha$, woraus $t = \sqrt{(2fb/g \cos \alpha)}$; da nun $fb/\cos \alpha = ab = d$, so ist auch hier $t = \sqrt{(2d/g)}$; die Fallzeit ist in allen Fällen dieselbe.

Fig. 59.



Aus dem Satze, daß die Geschwindigkeiten am Fuße der Länge und der Höhe der schiefen Ebene dieselben sind, und daß die Fallzeiten sich wie die Länge zur Höhe verhalten, darf man nicht etwa schließen, daß in gleichen Zeiten gleiche Wege auf der Länge und der Höhe zurückgelegt würden, vielmehr *verhalten sich die auf der Länge und längs der Höhe durchfallenen Wege in gleichen Zeiten umgekehrt wie die Länge zur Höhe.* Dies ergibt sich aus der zweiten Formel (20), wonach der Fallraum auf der schiefen Ebene $s = {}^1/_2 gt^2 \sin \alpha$, während der freie Fallraum in derselben Zeit ist $s' = {}^1/_2 gt^2$; durch Division entsteht $s : s' = \sin \alpha = h : l$. Der Weg auf der schiefen Ebene ist also kleiner als der freie Fallraum in derselben Zeit und zwar in dem Maße, in welchem die Höhe kleiner ist als die Länge.

129 Aufg. 194. Auf der Ebernburg ist ein Brunnen, in den ein Stein (von 1 kg) erst in $4^1/_2$ Sec. hinabfällt; wie tief ist derselbe, welche Geschw. hat der Stein beim Aufschlagen, und welches ist dann seine lebendige Kraft? Aufl.: Tiefe $^1/_2 \cdot 10 \cdot (4^1/_2)^2 = 101^1/_4$ m; Geschw. $= 10 \cdot 4^1/_2 = 45$ m; leb. Kraft $= {}^1/_2 mc^2 = {}^1/_2 \cdot {}^1/_{10} \cdot 45^2 = 101^1/_4$ mk. — A. 195. Welche Zeit würde ein Stein brauchen, um von der Spitze des Straßburger Münsters 125 m hoch herunterzufallen, und mit welcher Geschw. würde er anlangen? Aufl.: t = 5 Sec. und c = 50 m. — A. 196. Von welcher Höhe muß ein Stein herabfallen, um eine Geschw. von 100 m zu erlangen? Aufl.: $s = c^2/2g = 500$ m. — A. 197. Eine Kugel rollt auf einem Abhange von 30° Neigung 120 m weit hinab; mit welcher Geschw. und nach welcher Zeit langt sie am Fuße an? $c = \sqrt{(2gs \sin \alpha)} = 34{,}6$ m; $t = \sqrt{(2s/g \sin \alpha)} = 7$ Sec. — A. 198. Ein Eisenbahnzug von 100 Tonnen läuft auf einer Rampe von $^1/_{30}$ Steigung herab; welche Geschw. und welche lebendige Kraft hat er nach 3 Minuten? Aufl.: $c = gt \sin \alpha = 60$ m; leb. Kraft 18 Mill. mk. — A. 199. Wie groß muß der Neigungswinkel einer schiefen Ebene sein, damit ein Körper eine Beschleunigung von 5 m erhalte? Aufl.: $5 = 10 \sin \alpha$; hieraus $\alpha = 30°$.

3. Die Wurfbewegung. Auch mehrere Kräfte können eine fortschreitende und 130 sogar eine geradlinig fortschreitende Bewegung erzeugen, z. B. wenn auf einen Körper mehrere momentane Kräfte wirken, oder wenn momentane und continuirliche Kräfte auf einen Körper in derselben geraden Linie ihre Wirkung ausüben. Wirkt eine continuirliche Kraft aber nach einer anderen Richtung auf einen Körper als eine momentane, so wird die erste Kraft den Körper fortwährend von der geraden Linie ablenken, die er vermöge der letzten Kraft einschlagen muß; er wird also eine krummlinig fortschreitende Bewegung annehmen müssen, die unter Umständen zu einer drehenden werden kann. Die Wurfbewegung ist ein Beispiel für die letzterwähnten Fälle; denn eine solche entsteht, wenn ein freier Körper über der Erdoberfläche einen Stoß erhält und dann der Wirkung der Schwere überlassen wird.

Die Wurfbewegung ist geradlinig, wenn ein Körper senkrecht abwärts oder senkrecht aufwärts geworfen wird. Die Geschwindigkeit und der Wurfraum sind dann einfach gleich der Summe oder Differenz der durch den Stoß und durch den Fall erzeugten Größen; die Geschwindigkeit ist $v = c \pm gt$ und der Wurfraum $s = ct \pm \frac{1}{2} gt^2$. Von besonderem Interesse ist der Wurf senkrecht aufwärts; es entsteht dann die Frage nach der Höhe des Wurfes. *Der Körper steigt so hoch, als er hätte fallen müssen, um die Wurfgeschwindigkeit zu erlangen.* Denn die gleichförmig verzögerte Wurfbewegung senkrecht aufwärts ist zu Ende, wenn die Geschwindigkeit $v = 0$ ist, wenn also $c - gt = 0$, d. h. wenn $t = c/g$ ist. Setzen wir diesen Werth der Steigzeit in den Wurfraum s ein, so erhalten wir die Steighöhe $s = c^2/2g$. Dies ist aber nach 127 . (5) der Weg, den ein Körper durchfallen muß, um die Geschwindigkeit c zu erlangen; hiermit ist der Satz über die Steighöhe bewiesen.

Umgekehrt, wenn $c^2/2g = v^2/2g$, so muß $v = c$ sein; d. h. *ein senkrecht in die Höhe geworfener Körper langt mit derselben Geschwindigkeit wieder unten an, mit welcher er zu steigen anfing.* Eine senkrecht in die Höhe geschossene Büchsenkugel übt also bei ihrer Rückkehr dieselbe zerstörende Wirkung aus, die sie, direct auf einen ganz nahen Gegenstand abgeschossen, hätte ausüben können.

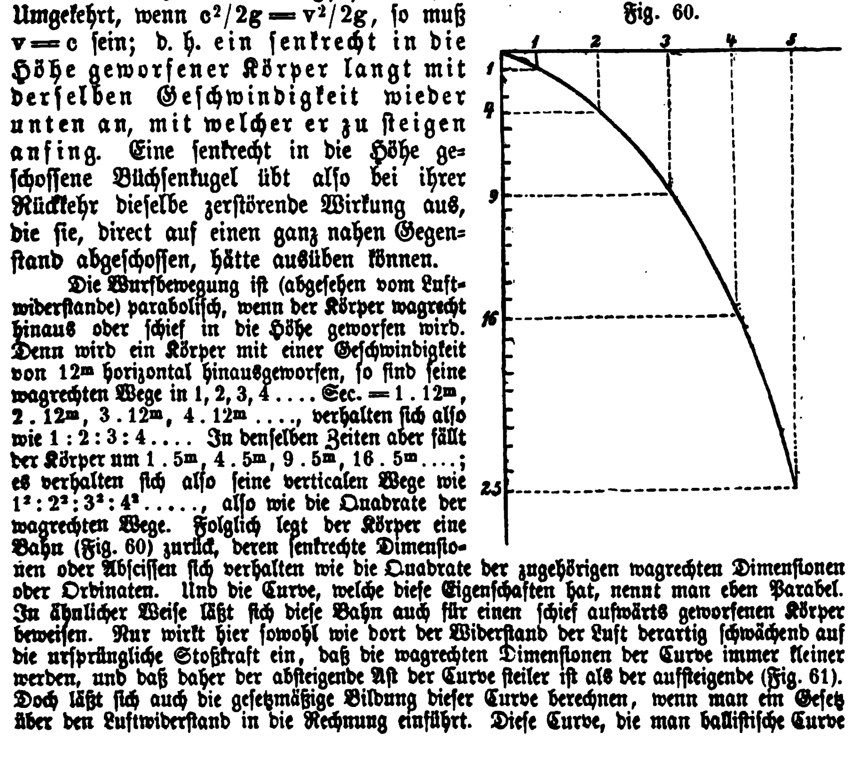
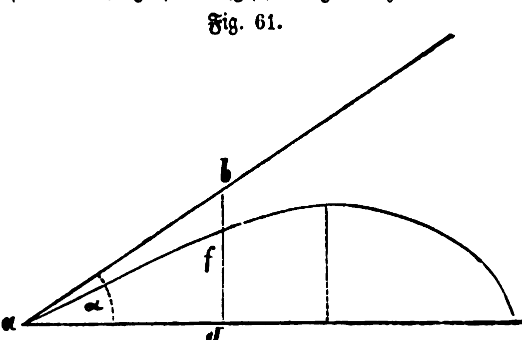


Fig. 60.

Die Wurfbewegung ist (abgesehen vom Luftwiderstande) parabolisch, wenn der Körper wagrecht hinaus oder schief in die Höhe geworfen wird. Denn wird ein Körper mit einer Geschwindigkeit von 12^m horizontal hinausgeworfen, so sind seine wagrechten Wege in 1, 2, 3, 4 .... Sec. = $1 . 12^m$, $2 . 12^m$, $3 . 12^m$, $4 . 12^m$ ...., verhalten sich also wie 1 : 2 : 3 : 4 .... In denselben Zeiten aber fällt der Körper um $1 . 5^m$, $4 . 5^m$, $9 . 5^m$, $16 . 5^m$ ....; es verhalten sich also seine verticalen Wege wie $1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2$ ....., also wie die Quadrate der wagrechten Wege. Folglich legt der Körper eine Bahn (Fig. 60) zurück, deren senkrechte Dimensionen oder Abscissen sich verhalten wie die Quadrate der zugehörigen wagrechten Dimensionen oder Ordinaten. Und die Curve, welche diese Eigenschaften hat, nennt man eben Parabel. In ähnlicher Weise läßt sich diese Bahn auch für einen schief aufwärts geworfenen Körper beweisen. Nur wirkt hier sowohl wie dort der Widerstand der Luft derartig schwächend auf die ursprüngliche Stoßkraft ein, daß die wagrechten Dimensionen der Curve immer kleiner werden, und daß daher der absteigende Ast der Curve steiler ist als der aufsteigende (Fig. 61). Doch läßt sich auch die gesetzmäßige Bildung dieser Curve berechnen, wenn man ein Gesetz über den Luftwiderstand in die Rechnung einführt. Diese Curve, die man ballistische Curve

nennt, ist von großer Wichtigkeit in den Artilleriewissenschaften. Besonders wichtig ist es, die Wurfhöhe h und die Wurfweite w für einen bestimmten Elevationswinkel α und eine bestimmte anfängliche Wurfgeschwindigkeit c zu kennen. Wir wollen diese Größen wenigstens für die rein parabolische Bahn bestimmen. Nach der Zeit t wäre der gerade Stoßweg $ab = ct$; da aber der Körper während dieser Zeit um $bf = \frac{1}{2}gt^2$ fällt, so ist die erreichte Höhe zu dieser Zeit $df = bd - bf = ct . \sin\alpha - \frac{1}{2}gt^2$, und die wagrechte Entfernung $ad = ct . \cos\alpha$. Die größte Entfernung oder Wurfweite ist erreicht, wenn die Höhe = 0 geworden ist, wenn also $ct \sin\alpha - \frac{1}{2}gt^2 = 0$, oder wenn $t = 2c \sin\alpha / g$. Setzen wir diesen Werth in die wagrechte Entfernung ein, so erhalten wir die Wurfweite $w = 2c^2 \sin\alpha \cos\alpha / g$ oder $w = c^2 \sin 2\alpha / g$. Die größte Höhe oder Wurfweite hat der Körper in der halben Wurfzeit, also wenn $t = 1/g . c \sin\alpha$, wodurch sich ergibt die Wurfhöhe $h = c^2 \sin^2\alpha / 2g$. Aus der Formel für die Wurfhöhe h ergibt sich, daß dieselbe den größten Werth erreicht, wenn $\sin\alpha$ am größten wird, wenn also $\alpha = 90^\circ$ ist, oder wenn der Körper senkrecht aufwärts steigt; dagegen erhält die Wurfweite ihren größten Werth, wenn $\sin 2\alpha$ ein Maximum ist, wenn also $2\alpha = 90^\circ$ oder $\alpha = 45^\circ$ ist.

Fig. 61.



131 Aufg. 200. Wie lange und wie hoch steigt eine Kugel, die mit einer Geschw. von 800^m senkrecht aufwärts geschossen wird, und mit welcher Geschw. langt sie wieder auf dem Boden an? Aufl.: $t = 80$ Sec.; $s = 32000^m$, $c = \sqrt{(2gs)} = 800^m$. — A. 201. Ein Zug von 12^m Geschw. verliert nach Dampfabschluß in jeder Sec. $\frac{1}{10}{}^m$ Geschw.; welche Geschw. hat der Zug nach 1 Min.; wann und nach welchem Wege kommt er zur Ruhe? Aufl.: Die Formeln für den Wurf senkrecht aufwärts $v = c - gt$ und $s = ct - \frac{1}{2}gt^2$ gelten nach 16. für jede gleichförmig verzögerte Bewegung. In diesem Falle ist $g = 0{,}1$, daher nach 1 Min. $v = 12 - 60 . 0{,}1 = 6^m$; für $v = 0$ ist $t = 12 / 0{,}1 = 120$ Sec. und $s = c^2 / 2g = 720^m$. — A. 202. Eine Kanonenkugel wird mit 600^m Geschw. unter einem Winkel von 15° in die Höhe geschossen; in welcher Entfernung erreicht sie den Boden? Aufl.: $w = c^2 \sin 2\alpha / g = 18000^m$. Für den Elevationswinkel 45° wäre die Wurfweite doppelt so groß $= 36000^m$. — A. 203. Unter welchem Winkel muß ein Körper in die Höhe geschossen werden, um bei einer Geschw. von 300^m eine Höhe von 1125^m zu erreichen? Aufl.: Aus $h = c^2 \sin^2\alpha / 2g$ folgt $\alpha = 30^\circ$.

b. Die drehende Bewegung.

132 **Winkelgeschwindigkeit und Trägheitsmoment.** Während bei einer fortschreitenden Bewegung alle Körpertheile identische Wege beschreiben, sind bei einer drehenden Bewegung oder Rotation die Wege der Moleküle nur einander ähnlich. Diese Wege sind meistens geschlossene Curven, am häufigsten Kreise. Die Größe derselben nimmt nach einer gewissen Richtung immer mehr ab, bis sie endlich gleich 0 wird. Die Punkte, welche bei einer drehenden Bewegung in Ruhe bleiben, bilden zusammen die Achse, deren Endpunkte Pole heißen. Manchmal ist die Achse nur eine gedachte Linie und nicht durch Körperatome gebildet; noch häufiger sind es nur einzelne Körper, die sich um die Achse drehen, so daß der größte Theil des Drehungsraumes leer ist, wie z. B. bei den Weltsystemen. Die senkrechte Entfernung eines Punktes von der Achse nennt man Radius oder Radius vector. Die Zeit, die der Punkt für seinen geschlossenen Weg braucht, heißt man Umlaufszeit; dieselbe ist für alle Punkte eines rotirenden Körpers gleich groß, während die Geschwindigkeiten dieser Punkte verschieden sind, da diese in gleichen Zeiten verschiedene Wege durchlaufen. Weil indessen alle Radien in der Umlaufszeit eine volle Drehung, einen Winkel von 360° zurücklegen, so müssen sie auch in einer

Secunde gleiche Winkel beschreiben. Die Größe des Winkels, welchen ein Radius in einer Secunde beschreibt, nennt man die **Winkelgeschwindigkeit**; sie kann auch durch die Größe eines Bogens vom Radius 1 angegeben werden und gibt ein Maß für die Schnelligkeit der Drehung. Sie macht indessen auch die Bestimmung der wirklichen Geschwindigkeit aller Moleküle des rotirenden Körpers möglich, sowie deren Radien r_1, r_2, r_3 .... bekannt sind; denn ist die Winkelgeschwindigkeit $= \omega$, so sind nach einem bekannten geometrischen Satze die Geschwindigkeiten jener Moleküle $= r_1 \omega$, $r_2 \omega$, $r_3 \omega$ .....

133 Um die Arbeit zu finden, welche für eine bestimmte Rotation nothwendig ist, müßte man nach dem ersten Satze über die lebendige Kraft, $ks = \frac{1}{2} mv^2$, die lebendige Kraft des rotirenden Körpers kennen. Da die Geschwindigkeiten der einzelnen Massenpunkte verschieden, aber durch die Winkelgeschwindigkeit ω darstellbar sind, so liegt der Gedanke nahe, die lebendige Kraft durch diese auszudrücken. Man könnte dieselbe durch $\frac{1}{2} T \omega^2$ darstellen, wenn T eine ideale Masse wäre, die, in der Entfernung 1 von der Drehachse angebracht, bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ω auch dieselbe lebendige Kraft wie der rotirende Körper in sich trüge. Denn diese Masse T hätte dann die wirkliche Geschwindigkeit ω, also die lebendige Kraft $\frac{1}{2} T \omega^2$. Ließe sich eine solche ideale Masse finden, so würde dieselbe mit $\frac{1}{2} \omega^2$ multiplicirt, ihre eigene und daher auch die lebendige Kraft des rotirenden Körpers ergeben, und sie würde wegen derselben lebendigen Kraft auch dasselbe Beharrungsvermögen, dieselbe Trägheit, wie die rotirende Masse zu besitzen; man nennt daher diese gedachte Masse das Trägheitsmoment; das Moment derselben ist nämlich gleich der Masse, da ihr Hebelarm $= 1$ ist. **Unter Trägheitsmoment versteht man also die ideale Masse, die in der Entfernung 1 von der Drehachse angebracht, bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dieselbe lebendige Kraft wie der rotirende Körper besitzt.**

Um das Trägheitsmoment T zu finden, müssen wir daher sehen, welcher Ausdruck mit $\frac{1}{2} \omega^2$ multiplicirt die lebendige Kraft des rotirenden Körpers ergibt. Zu dem Zwecke bestimmen wir die lebendige Kraft desselben. Sind die Massen der einzelnen Moleküle $= m_1$, m_2, m_3 ...., so sind ihre lebendigen Kräfte $= \frac{1}{2} m_1 r_1^2 \omega^2$, $\frac{1}{2} m_2 r_2^2 \omega^2$, $\frac{1}{2} m_3 r_3^2 \omega^2$ u. s. w.; daher ist die lebendige Kraft des rotirenden Körpers $= \frac{1}{2} \omega^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + \ldots)$. Der Klammerausdruck ist die Summe der Producte aller Molekülmassen mit den Quadraten der Radien derselben; bezeichnen wir diese Summe mit Σmr^2, so ist die lebendige Kraft des rotirenden Körpers $= \frac{1}{2} \omega^2 \Sigma mr^2$. Den Ausdruck aber, die ideale Masse, die mit $\frac{1}{2} \omega^2$ multiplicirt, die lebendige Kraft des Körpers gibt, haben wir Trägheitsmoment genannt. **Das Trägheitsmoment eines Körpers ist demnach gleich der Summe der Producte aller Molekülmassen mit den Quadraten der Radien derselben $= \Sigma mr^2$.**

Da das Trägheitsmoment die Summe unendlich vieler Producte ist, so kann dasselbe im Allgemeinen nur durch die Anwendung der Infinitesimalrechnung gefunden werden. In einzelnen Fällen kann man es auch durch elementare Rechnung finden. Hat eine große Masse ein kleines Volumen und ist weit von der Drehachse entfernt, so ist das Trägheitsmoment genau genug für die Praxis gleich dem Product der Masse mit dem Quadrat ihres mittleren Achsenabstandes. — Zwei rotirende Körper haben gleiches Beharrungsvermögen bei gleicher Winkelgeschwindigkeit, wenn ihre Trägheitsmomente gleich sind, wenn also $MR^2 = mr^2$, oder wenn ihre Massen sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate ihrer Achsenabstände. Dieser Satz und damit die ganze Lehre von den Trägheitsmomenten kann man experimentell nachweisen. An einer leichten Stange (Fig. 62), die in Decimeter getheilt ist, wird genau in der Mitte eine Tragschneide angebracht; zu beiden Seiten derselben in 1^{dm} Entfernung sind 1^{kg} schwere Bleilinsen a angeschraubt. Hängt man die Vorrichtung an einem [illegible] auf, so ist sie in indifferentem Gleichgewichte, also in jeder Lage in Ruhe. Bringt man aber unten noch eine Bleilinse b an, so ist jetzt stabiles Gleichgewicht; wenn man daher die Vorrichtung aus ihrer Lage dreht, so wird sie durch die Fallkraft des Gewichtes b wieder zurück-

getrieben und gelangt nach einer Anzahl von Schwingungen wieder zur Ruhe. Aus der Zahl und Größe der in einer Minute stattfindenden Schwingungen kann man die Winkelgeschwindigkeit der Drehung berechnen. Schraubt man nun statt der Linsen a von 1^{kg} solche von $^1/_4{}^{kg}$ in 2^{dm} Entfernung von der Schneide an, so ist die Zahl der Schwingungen in 1 Min., also auch die Winkelgeschwindigkeit noch dieselbe wie vorher; folglich haben diese 4mal kleineren Linsen in der doppelten Entfernung dasselbe Beharrungsvermögen, womit der obige Satz nachgewiesen ist. Es ist auch leicht ersichtlich, daß die lebendige Kraft noch dieselbe ist wie vorher; denn die 4mal kleineren Massen haben die doppelte Geschwindigkeit erhalten; endlich ist auch die Arbeit, welche die lebendige Kraft erzeugte, in beiden Fällen dieselbe, nämlich die durch den Fall des Gewichtes b entwickelte Arbeit. — Auch mit Schleiermachers Centrifugalapparat (Külp 1. S. 166) lassen sich diese Gesetze nachweisen.

Fig. 62.

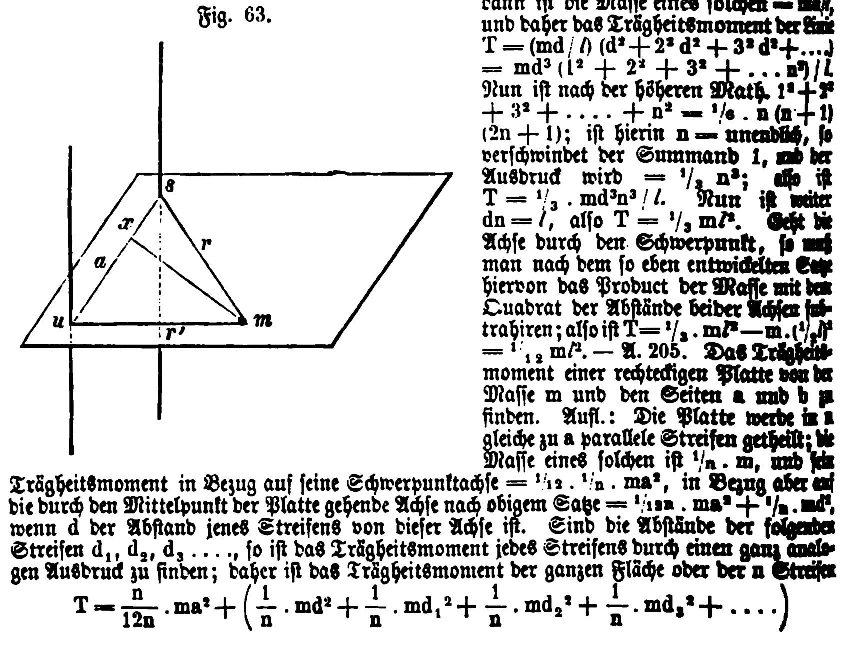
Das Beharrungsvermögen eines rotirenden Körpers ist um so größer, je größer sein Trägheitsmoment ist, je weiter also die Hauptmasse von der Drehachse entfernt ist. Eine schwere eiserne Welle hat daher ein geringes Beharrungsvermögen gegen ein Schwungrad von gleichem Gewichte, dessen Hauptmasse in dem äußeren Ringe, dem Schwungringe liegt. In diesem großen Beharrungsvermögen liegt die Anwendung von Schwungrädern, die Schwankungen in dem Gange einer Maschine auszugleichen und sie über todte Punkte hinaus zu reißen.

Das Trägheitsmoment eines Körpers in Bezug auf irgend eine Achse ist gleich dem Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf eine parallele Schwerpunktachse vermehrt um das Product der Körpermasse mit dem Quadrat des Abstandes der beiden Achsen.

Beweis (Fig. 63). Nach einem bekannten geometrischen Lehrsatze ist $r_1^2 = r^2 + a^2 - 2ax$, also auch $mr_1^2 = mr^2 + ma^2 - 2max$, und durch Summation aller solcher für sämmtliche Moleküle m geltenden Gleichungen entsteht $\Sigma mr_1^2 = \Sigma mr^2 + \Sigma ma^2 - 2a\Sigma mx$. Nun ist aber, wenn s der Schwerpunkt ist, nach dem Bestimmungssatze des Schwerpunktes (118) $\Sigma mx = 0$, und Σm ist die ganze Körpermasse M; also ist $\Sigma mr_1^2 = \Sigma mr^2 + Ma^2$. Der erste Summand ist aber das Trägheitsmoment in Bezug auf die parallele durch den Schwerpunkt s gehende Achse, womit der Satz bewiesen ist.

134 Aufg. 204. Das Trägheitsmoment einer Linie in Bezug auf ihren Endpunkt zu finden. Aufl.: Die Linie l werde in n (unendlich viele) Theilchen zerlegt von der Länge d; dann ist die Masse eines solchen $= md/l$, und daher das Trägheitsmoment der Linie $T = (md/l)(d^2 + 2^2 d^2 + 3^2 d^2 + \ldots) = md^3 (1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots n^2)/l$. Nun ist nach der höheren Math. $1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots + n^2 = {}^1/_6 . n(n+1)(2n+1)$; ist hierin n = unendlich, so verschwindet der Summand 1, und der Ausdruck wird $= {}^1/_3 n^3$; also ist $T = {}^1/_3 . md^3n^3/l$. Nun ist weiter $dn = l$, also $T = {}^1/_3 ml^2$. Geht die Achse durch den Schwerpunkt, so muß man nach dem so eben entwickelten Satze hiervon das Product der Masse mit dem Quadrat der Abstände beider Achsen subtrahiren; also ist $T = {}^1/_3 . ml^2 - m.({}^1/_2 l)^2 = {}^1/_{12} ml^2$. — A. 205. Das Trägheitsmoment einer rechteckigen Platte von der Masse m und den Seiten a und b zu finden. Aufl.: Die Platte werde in n gleiche zu a parallele Streifen getheilt; die Masse eines solchen ist $^1/_n . m$, und sein Trägheitsmoment in Bezug auf seine Schwerpunktachse $= {}^1/_{12} . {}^1/_n . ma^2$, in Bezug aber auf die durch den Mittelpunkt der Platte gehende Achse nach obigem Satze $= {}^1/_{12n} . ma^2 + {}^1/_n . md^2$, wenn d der Abstand jenes Streifens von dieser Achse ist. Sind die Abstände der folgenden Streifen $d_1, d_2, d_3 \ldots$, so ist das Trägheitsmoment jedes Streifens durch einen ganz analogen Ausdruck zu finden; daher ist das Trägheitsmoment der ganzen Fläche oder der n Streifen

Fig. 63.



$$T = \frac{n}{12n} . ma^2 + \left(\frac{1}{n} . md^2 + \frac{1}{n} . md_1^2 + \frac{1}{n} . md_2^2 + \frac{1}{n} . md_3^2 + \ldots\right)$$

Der Klammerausdruck ist aber offenbar das Trägheitsmoment einer schweren Linie b in Bezug auf eine durch den Schwerpunkt gehende Achse, welche von den einzelnen Punkten um $d, d_1, d_2, d_3 \ldots$ entfernt ist, und welches nach Aufg. 204 gleich $^1/_{12} . mb^2$ ist; daher ist endlich $T = {^1/_{12}} . m (a^2 + b^2)$. Geht die Achse durch einen Eckpunkt der Platte, so ist hierzu nach obigem Satze $^1/_4 . m (a^2 + b^2)$ zu addiren; folglich ist dann $T = {^1/_3} . m (a^2 + b^2)$. — A. 206. Das Trägheitsmoment eines rechteckigen Stabes mit den Kanten a, b und c zu finden. Aufl.: Man theile den Körper in n Streifen durch Ebenen senkrecht zu c. Für einen solchen Streifen ist in Bezug auf die Schwerpunktachse $T = {^1/_{12}} . m/n . (a^2 + b^2)$, da m die Masse des ganzen Körpers, also m/n die Masse eines Streifens; daher ist für den ganzen Körper $T = {^1/_{12}} . m . (a^2 + b^2)$. Ist die Kante c selbst die Achse, so ist $T = {^1/_3} . m (a^2 + b^2)$. Wird die Kante $b = 0$, so ist das Parallelepiped ein Rechteck, dessen Seiten a und c sind, und dessen Seite c entweder selbst die Achse oder parallel zu der durch die Mitte gehenden Achse ist. In diesen beiden Fällen sind dann die Trägheitsmomente $= {^1/_3} . ma^2$ und $= {^1/_{12}} . ma^2$. Hat man nicht die Masse m, sondern nur die Seiten a und c, so ist $m = ac$, also in dem letzten Falle $T = {^1/_{12}} . a^3c$. — A. 207. Die relative Festigkeit eines rechteckigen Balkens von der Länge l, der Breite b und der Höhe h zu finden. Aufl.: Die relative Festigkeit ist die Kraft P, welche in dem gefährlichsten Querschnitte des Balkens eine Spannung hervorruft, durch welche die Fasern brechen. Der gefährlichste Querschnitt ist an einem nur einerseits festgehaltenen, eingemauerten oder eingespannten Balken derjenige, an welchem der Stab eingespannt ist, weil für diesen die Kraft P das größte Moment Pl hat. Soll der Balken brechen, so müssen die Momente aller in jenem Querschnitte stattfindenden Spannungen zusammen gleich dem Momente Pl der brechenden Kraft sein. Die in dem Querschnitte 1 bei dem Bruche überwundene Spannung ist bekanntlich gleich dem Coëfficienten der absoluten Festigkeit $= f$; daher ist die in dem ganzen Querschnitte q einer Faser herrschende Spannung $= fq$. Ist nun diese Faser um d von der neutralen Faser, welche ja die Drehachse der sich biegenden Fasern bildet, entfernt, so ist das Moment der Faserspannung $= qd . f$. Für andere Fasern, deren Querschnitte $q_1, q_2, q_3 \ldots$ sind, und welche bezüglich die Abstände $d_1, d_2, d_3 \ldots\ldots$ von der neutralen Faser haben, sind analog diese Momente $= q_1 d_1 . f_1, q_2 d_2 . f_2, q_3 d_3 . f_3 \ldots$ — Weil nun die Ausdehnungen und Verkürzungen und daher auch die Spannungen der Fasern den Abständen von der neutralen Faser proportional sind, so ist $f_1 : f = d_1 : d$, ebenso $f_2 : f = d_2 : d$, ebenso $f_3 : f = d_3 : d \ldots$, woraus $f_1 = fd_1 / d$, $f_2 = fd_2 / d$, $f_3 = fd_3 / d \ldots$; die Momente der Faserspannungen sind daher $fq_1 d_1^2 / d$, $fq_2 d_2^2 / d$, $fq_3 d_3^2 / d \ldots$ — Die Summe aller dieser Momente ist $f (qd^2 + q_1 d_1^2 + q_2 d_2^2 + q_3 d_3^2 + \ldots) / d$. Der Klammerausdruck aber enthält das Trägheitsmoment T des rechteckigen Querschnittes; folglich ist die Momentensumme aller Faserspannungen $= fT / d$, und da diese für den Bruch dem Moment der brechenden Kraft P gleich sein muß, so ergibt sich die Gleichung $Pl = fT / d$. Für einen rechteckigen Balken ist nach A. 206 $T = {^1/_{12}} h^3b$, und $d = {^1/_2} h$, da die eben gefundene Gleichung für die äußerste Faser gelten muß. Durch Substitution dieser Werthe entsteht $P = f/_6 . bh^2 / l$, eine Formel, die wir schon in 71. verwendet haben. Dieses Beispiel deutet auf die Wichtigkeit der Trägheitsmomente in der Festigkeitslehre hin.

Nach dem Satze von Renleaux und Moll (s. 64.) soll die Faserspannung nicht über die Elasticitätsgrenze hinausgehen; statt f muß also der Tragmodul t gesetzt werden, und diese Spannung darf höchstens in der äußersten Faser stattfinden. In der Gleichung $Pl = tT / d$ bedeutet d daher den Abstand der äußersten Faser und P die biegende Kraft. Da diese Gleichung ganz unabhängig von der Form des Balkens ist, so gilt sie allgemein und enthält einen wichtigen Satz der Festigkeitslehre: Das Moment der biegenden Kraft ist für die Elasticitätsgrenze gleich dem Product aus dem Tragmodul mit dem Trägheitsmoment dividirt durch den Abstand der äußersten Faser von der neutralen Faser.

135 **1. Die Pendelbewegung** (Galilei 1602). Ein Pendel ist jeder Körper, der um einen Punkt außerhalb seines Schwerpunktes drehbar aufgehängt ist. Das einfachste Pendel ist das mathematische: ein schwerer Punkt, der durch eine gewichtlose Linie mit dem Drehpunkte verbunden ist. Kein wirkliches Pendel ist ein mathematisches; die wirklichen Pendel werden physische genannt; dem nur gedachten mathematischen Pendel kommt am nächsten eine kleine Kugel von Platin, Gold oder Blei, die an einem feinen Faden hängt.

Bringt man ein solches mathematisches Pendel aus seiner Gleichgewichtslage und läßt es alsdann los, so ist der Schwerpunkt nicht mehr unterstützt; folglich muß das Pendel fallen. Die Kugel beschreibt hierbei einen Kreisbogen, weil sie immer gleichweit vom Aufhängepunkte entfernt ist; diesen Bogen kann man sich aus un=

endlich vielen kleinen geraden Elementen bestehend denken, von denen das tiefste wagrecht ist, und die anderen eine um so größere Neigung gegen den Horizont haben, je höher sie liegen: sie können alle als schiefe Ebenen von nach unten hin abnehmender Neigung angesehen werden. In jedem Moment durchläuft die Pendelkugel eine solche schiefe Ebene, erfährt daher in jedem Moment nach 128. die Acceleration g sin a. An dem obersten Punkte ist sin a und daher auch diese Acceleration am größten; dieselbe nimmt immer mehr ab, bis sie in dem tiefsten Punkte = 0 ist. Weil nun aber nach dem Gesetze der Trägheit die in jedem früheren Moment erlangte Geschwindigkeit erhalten bleibt und in jedem folgenden Moment eine neue, jedoch immer kleiner werdende hinzukommt, so muß die Geschwindigkeit des Pendels fortwährend, aber immer weniger, zunehmen; die Pendelbewegung ist beim Niederfallen eine ungleichförmig beschleunigte Bewegung. In dem tiefsten Punkte der Bahn ist die Geschwindigkeit am größten. Mit dieser Geschwindigkeit muß das Pendel über den tiefsten Punkt hinausgehen und daher auf der anderen Seite in die Höhe steigen. Während dieses Steigens verliert das Pendel in jedem Moment genau dieselbe Geschwindigkeit, die es auf der entsprechenden schiefen Ebene des Niederganges gewonnen hat; folglich muß, abgesehen von den Widerständen, das Pendel mit ungleichförmig verzögerter Bewegung ebenso hoch steigen, als es heruntergefallen ist. Die eben geschilderte Bewegung nennt man eine Schwingung oder Oscillation, die Größe des durchlaufenen Bogens Schwingungsbogen, die hierzu nöthige Zeit Schwingungszeit. Ein mathematisches Pendel würde, einmal in Bewegung gesetzt, ins Unendliche weiter schwingen, weil es nach Beendigung der ersten und jeder folgenden Schwingung immer wieder in derselben Lage wäre, wie am Anfange der ersten Schwingung, und weil ihm keine Widerstände entgegenwirkten. Ein physisches Pendel aber hat den Widerstand der Luft und die Reibung an den Aufhängepunkten zu überwinden, wodurch seine Fallkraft immer mehr geschwächt wird, so daß die Schwingungen immer kleiner werden und endlich ganz aufhören.

136 Gesetze der Pendelbewegung. 1. Die Schwingungszeit ist für kleine Schwingungsbogen unabhängig von der Größe derselben. 2. Die Schwingungszeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge. Das erste Gesetz sagt aus, daß ein hoch gehobenes Pendel für seinen großen Weg nur dieselbe Zeit braucht wie ein wenig gehobenes für seinen kleinen Weg; es ist dies erklärlich; denn das hoch gehobene Pendel fällt steiler herab, hat daher eine größere Geschwindigkeit als das andere. Das zweite Gesetz läßt sich aus dem sechsten Fallgesetze ableiten; denn nach diesem verhalten sich die Schwingungszeiten wie die Quadratwurzeln aus den Schwingungsbogen; statt der Schwingungsbogen kann man die Pendellängen setzen, weil sich zwei Bogen von gleichen Centriwinkeln wie ihre Radien verhalten, welche hier die Pendellängen sind. Wir werden sogleich beweisen, daß die Schwingungszeit $t = \pi \sqrt{(l/g)}$ ist. In dieser Formel kommt der Schwingungsbogen gar nicht vor, und die Wurzel aus der Pendellänge steht im Zähler; folglich ist mit dieser Formel bewiesen, daß die Schwingungszeit unabhängig ist vom Schwingungsbogen und direct proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge. Man kann diese Sätze nachweisen mit an Fäden aufgehängten Kugeln. Für kleine Schwingungsbogen macht ein solches Pendel in der ersten Minute ebenso viele Schwingungen wie in der letzten; für größere Bogen aber findet dies nicht mehr statt, also gilt das erste Gesetz nur mit der zugefügten Einschränkung, etwa bis 10°. — Hat man Pendel, von denen das zweite 4 mal, das dritte 9 mal so lang ist als das erste, so macht das zweite in einer Minute halb, das dritte den 3 ten Theil so viel Schwingungen als dieses; folglich dauern die Schwingungen des zweiten 2 mal, die des dritten 3 mal so lang, womit der zweite Satz nachgewiesen ist.

Strengerer Beweis der zwei Gesetze. Die Formel für die Schwingungszeit $t = \pi\sqrt{(l/g)}$ ist nicht genau, sondern muß eigentlich heißen 137

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left\{ 1 + (1/2)^2 \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \cdot \left(\sin \frac{\alpha}{2}\right)^4 + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 \left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^6 + \ldots \right\},$$

wo α den dem halben Schwingungsbogen entsprechenden Winkel, den sogenannten Elongationswinkel bedeutet; indessen wollen wir doch jene für kleinere Winkel hinreichend genaue und sehr wichtige Formel, welche auch die beiden Gesetze enthält, beweisen. Wir erhalten hierbei gleichzeitig eine Formel für die Schwingungszeit von Körpern, die durch ihre Elasticität schwingen.

Es sei (Fig. 64) p das Gewicht der Pendelkugel oder des schweren, an einem Faden befestigten Punktes, der aus seiner Ruhelage gebracht, durch die tangentiale Componente seines Gewichtes p in jene zurückzugehen strebt. Diese Componente ist

$$q = p \sin \alpha = p \sin \frac{b}{l} = p \cdot \frac{b}{l} = p \cdot \frac{a}{l} \quad \ldots\ldots\ldots (I)$$

Fig. 64.

weil für sehr kleine Bogen der Sinus mit dem Bogen und dieser mit der Sehne vertauscht werden darf. Unter dieser Voraussetzung ist die zurücktreibende Kraft q dem Abstande a von der Ruhelage direct proportional. Da hierbei sehr kleine Bogen vorausgesetzt sind, so gilt das Resultat dieser Betrachtung bei dem Pendel nur für sehr kleine Bogen genau, für kleinere ungenau, für größere gar nicht; für die Schwingungen durch Elasticität ist aber das Resultat genau, so lange das Hooke'sche Gesetz: Ut tensio sic vis (65.) gilt. Bezeichnen wir nun die in der Entfernung 1 auf die Masse m wirkende zurücktreibende Kraft mit k, so ist $q = ka$; ebenso ist die in dem Abstande s wirksame Kraft $= ks$ und die in der Entfernung $s - x$ wirksame Kraft $= k(s - x)$. Bedeutet hierbei s den Abstand der äußersten Lage des schweren Punktes von der Ruhelage und $s - x$ seinen Abstand, wenn er (Fig. 65) sich der Ruhelage um x genähert hat, so ist die während dieses Näherns geleistete Arbeit $= 1/2\, x\,[ks + k(s - x)] = 1/2\, kx\,(2s - x)$. Da diese Arbeit nach dem ersten Satze über die lebendige Kraft gleich der lebendigen Kraft des Pendels ist, so erhalten wir die Grundgleichung:

$$1/2\, mv^2 = 1/2\, kx\,(2s - x), \text{ woraus}$$

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}(2s - x)\,x} \quad \ldots\ldots\ldots (II).$$

Fig. 65.

Denken wir uns nun über dem doppelten größten Abstande, also über der Strecke 2s (Fig. 66) einen Halbkreis beschrieben und am Ende der Annäherung x eine Ordinate y errichtet, so ist dieselbe nach dem Satze vom rechtwinkeligen Dreieck $y = \sqrt{(2s - x)\,x}$. Setzen wir diesen Wurzelausdruck in Gl. (II) ein, so erhalten wir

$$v = y\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (III).$$

Wenn nun weiter dx ein so kleiner Theil von x ist, daß während desselben die Bewegung als gleichförmig angesehen werden kann, und wenn dt die für diesen kleinen Weg dx nöthige Zeit bedeutet, so ist bekanntlich $dx = v \cdot dt$, woraus durch Einsetzung von Gl. (III) entsteht

$$dx = dt \cdot y\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \ldots\ldots\ldots (IV)$$

Fig. 66.

Ziehen wir nun auch die Ordinate zu dx und durch ihren Endpunkt die kleine Strecke parallel und gleich dx, so entsteht ein kleines rechtwinkeliges Dreieck, das dem großen von s und y gebildeten ähnlich ist; daher gilt die Proportion $dx : b = y : s$. Wird hieraus dx bestimmt und seinem Werthe aus Gl. IV gleichgesetzt, so erhält man

$$dt \cdot y \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{by}{s} \text{ woraus } dt = \frac{b}{s}\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Das Zeittheilchen dt, das zum Durchlaufen der Theilstrecke dx nöthig ist, wird also gefunden, indem man den zugehörigen Bogen des Hilfskreises mit nicht variabeln Größen dividirt und multiplicirt; also wird die Zeit zum Durchlaufen der ganzen Strecke 2s, d. i. die Schwingungszeit t gefunden, indem man die Summe aller zugehörigen Hilfskreisbogen, d. i. die Länge πs des Halbkreises mit denselben nicht variabeln Größen dividirt und multiplicirt; also

$$t = \frac{\Sigma b}{s}\sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{\pi s}{s}\sqrt{\frac{m}{k}} \text{ oder } t = \pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \ldots\ldots\ldots (21).$$

Diese Fl. (21) gilt für alle Schwingungsbewegungen, bei denen die Kraft dem Abstande proportional ist; sie ist die Grundlage für die Theorie der Wellen, die durch Elasticität entstehen, also der Theorie des Schalles, des Lichtes und der Wärme. Die Pendelformel geht aus derselben hervor, wenn wir für die Masse m die bekannte Beziehung p/g setzen; für k müssen wir nach dem Eingange dieser Entwickelung q/a setzen oder nach (I) pa/la = p/l. Werden diese Substitutionen vorgenommen, so folgt

$$t = \pi\sqrt{\frac{p}{g} / \frac{p}{l}} = \pi\sqrt{\frac{lp}{pg}} \text{ oder } t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}} \ldots \text{(Pendelformel) (Huyghens, 1673) (22)}$$

Die Zahl der Schwingungen, die ein Pendel in einer Minute oder in einer Stunde macht, wird ebenso viel mal größer als die Schwingzeit kleiner wird; sie steht in umgekehrtem Verhältnisse zu der Schwingzeit. Die Quadrate der Schwingzeiten verhalten sich aber nach dem zweiten Satze direct wie die Pendellängen; demnach kann man diesem Satze auch folgende Form geben: Die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten sich umgekehrt wie die Pendellängen oder $n^2 : n_1^2 = l_1 : l$ (Gesetz der Schwingungszahlen).

138 **Das physische Pendel.** (Huyghens 1673). Jedes wirkliche oder physische Pendel, gewöhnlich aus einer Stange mit verschiebbaren Gewichten geformt, besteht aus unendlich vielen mathematischen Pendeln; denn jenes enthält unendlich viele Körpermoleküle, schwere Punkte, von denen jeder durch die übrigen mit dem Aufhängepunkte in Verbindung steht, also ein mathematisches Pendel bildet. Die dem Aufhängepunkte näheren Moleküle bilden kleine Pendel, welche nach dem zweiten Satze schnell zu schwingen streben; die entfernteren Moleküle bilden lange Pendel, haben also das Bestreben, langsame Schwingungen zu machen. Durch die feste Verbindung der näheren und entfernteren Punkte mit einander müssen die näheren in ihrer natürlichen Bewegung verzögert, die entfernteren beschleunigt werden. Zwischen den verzögerten und den beschleunigten Molekülen muß es daher einen Punkt geben, der weder verzögert, noch beschleunigt wird, der also gerade so schwingt, als ob er ganz allein vorhanden wäre und so ein mathematisches Pendel bilden würde. Man nennt diesen Punkt den Schwingungspunkt und seine Entfernung vom Aufhängepunkte die reducirte Länge des physischen Pendels, weil das physische Pendel genau so schwingt wie das mathematische Pendel von dieser Länge. Wenn man daher den Schwingungspunkt und hierdurch die reducirte Länge von Pendeln beliebiger Formen kennt, so kann man nach Formel (22) auch die Schwingzeit derselben finden, und kann umgekehrt physische Pendel anfertigen, die eine im Voraus bestimmte Schwingungszeit haben; beträgt z. B. die Schwingungszeit eine Secunde, so nennt man das Pendel ein Secundenpendel. Es ist daher die Berechnung der reducirten Pendellänge die erste Aufgabe beim physischen Pendel.

139 **Gesetze des physischen Pendels.** 1. Die reducirte Länge des physischen Pendels ist gleich dem Quotient des Trägheitsmoments des Pendels durch das statische Moment seiner Masse.

Beweis. Denken wir uns in dem Schwingungspunkte, dessen Abstand vom Aufhängepunkte gleich der gesuchten Länge x ist, eine Masse m' concentrirt, welche dieselbe Winkelgeschwindigkeit wie das Pendel besitzt, so muß ihr Trägheitsmoment $m'x^2$ gleich dem Trägheitsmoment T des Pendels sein, woraus $m' = T/x^2$ . . . . . I.

Wenn die Masse des Pendels $= m$ ist, also sein Gewicht $= mg$, und der Abstand des Schwerpunktes vom Aufhängepunkte $= d$, so ist das statische Moment des Gewichtes $= mgd$; soll nun eine in dem Schwingungspunkte auf die Masse m' wirkende Kraft k dieselbe Wirkung hervorbringen wie dieses Gewicht, so müssen die statischen Momente der beiden Kräfte einander gleich sein; also ist $kx = mgd$, woraus $k = mgd / x \ldots\ldots$ II.

Die Acceleration a aber, welche durch eine Kraft k in einer Masse m' hervorgebracht wird, ist nach Fl. (8) bekanntlich $= k / m'$; also ist nach unseren Werthen I und II $a = (mgd / x) / (T / x^2) = mgdx / T$. Die im Schwingungspunkte concentrirte Masse soll nun wie das ganze Pendel schwingen, folglich muß ihre Acceleration gleich der der Schwere sein; also ist $mgdx / T = g$, woraus $x = T / md$, was zu beweisen war.

Practisch findet man die ungefähre red. Länge eines physischen Pendels, wenn man vor dasselbe ein mathematisches Pendel so hängt, daß die Aufhängepunkte in einer Wagerechten liegen, und wenn man nachher das letztere so lange verkürzt oder verlängert, bis die beiden Pendel gleich schwingen, coincidiren; dann befindet sich der Schwingungspunkt genau hinter der schwingenden Kugel. Bestehen Pendel aus leichten Stangen mit schweren Linsen, so liegt der Schwingungspunkt in der Linse; durch Verschieben derselben läßt sich daher die Länge und die Schwingzeit des Pendels ändern.

2. Der Schwingungspunkt liegt tiefer als der Schwerpunkt.

Beweis. Nach dem Satze S. 140 ist das Trägheitsmoment T des Pendels gleich dem Trägheitsmoment T' in Bezug auf eine parallele Schwerpunktachse vermehrt um md^2; also ist $T = T' + md^2$; hieraus ergibt sich nach dem ersten Gesetze $x = (T' + md^2) / md = d + (T' / md)$, d. h. x ist immer größer als d, der Abstand des Schwerpunktes.

3. Wenn man den Schwingungspunkt mit dem Aufhängepunkte vertauscht, so wird die Schwingungszeit nicht geändert. Man nennt ein Pendel, das auch an seinem Schwingungspunkte eine Schneide trägt, und an welchem man daher Schwingungspunkt und Aufhängepunkt vertauschen kann, ohne die Schwingungszeit zu ändern, ein Reversionspendel.

Beweis. Der Schwingungspunkt ist vom Schwerpunkte um $x - d$ entfernt; wenn wir das Pendel im Schwingungspunkte aufhängen, so ergibt sich hiernach seine reducirte Länge x', indem wir in dem Werthe für x aus dem vorigen Beweise an die Stelle von d den jetzt geltenden Werth $x - d$ setzen; dann ist $x' = x - d + [T' / m(x - d)]$. Nun folgt gerade aus jenem Werthe von x die Gleichung $x - d = T' / md$; setzen wir diesen Werth in den für x' ein, so ergibt sich $x' = \frac{T'}{md} + \frac{T' . md}{mT'} = \frac{T'}{md} + d$, welcher Werth mit dem von x im vorigen Beweise vollkommen übereinstimmt. Wenn nun die reducirte Länge zweier Pendel dieselbe ist, so ist auch ihre Schwingungszeit dieselbe. Nach Bohnenberger (1811) läßt sich jede leichte Stange, welche an einem Ende und um ein Drittel ihrer Länge vom anderen Ende entfernt Aufhängeschneiden und zwischen denselben verschiebbare Gewichte trägt, durch Verschieben der Gewichte zu einem Reversionspendel machen.

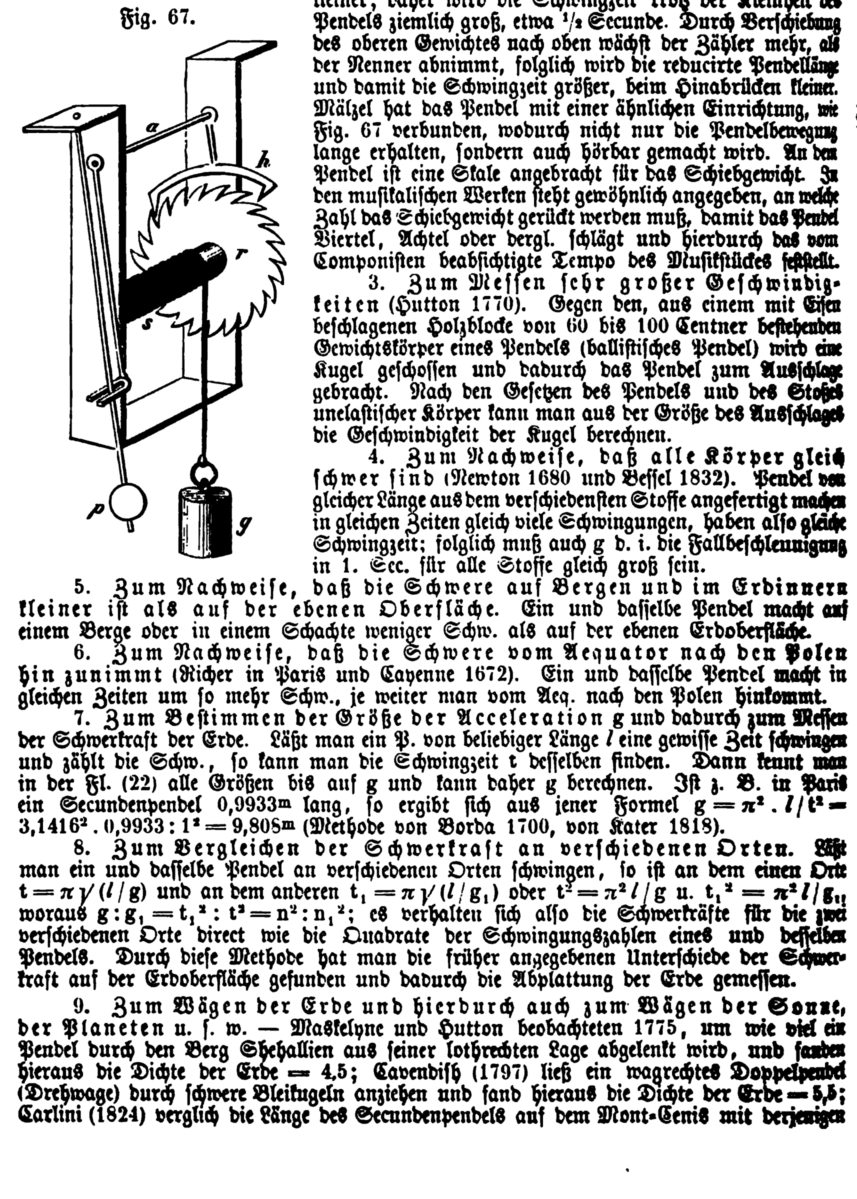
Auf. 208. Den Schwingungspunkt einer dünnen Stange zu finden. Aufl.: Nach 134. Aufg. 204 ist $T = \frac{1}{3} . ml^2$. Dividirt man dies durch $\frac{1}{2} ml$, so ist $x = \frac{2}{3} l$, d. h. der Schwingungspunkt ist um $\frac{1}{3}$ vom unteren Ende entfernt. — A. 209. Wie groß ist die Schwingzeit eines Pendels, dessen Schwingungspunkt um 1^m vom Aufhängepunkt entfernt ist: Aufl.: $t = \pi \sqrt{(l / g)} = 1{,}0031$ Sec. = sehr nahe 1 Sec. — A. 210. Wie lang muß eine Stange sein, die halbe Secunden schwingen soll? Aufl.: $\frac{1}{2} = \pi \sqrt{(l / g)}$; hieraus $l = 0{,}2484^m$; nach Aufg. 208 noch die Hälfte hinzu, gibt die Länge der Stange $= 0{,}3737^m$. — A. 211. Welche Schwingungen würde ein Pendel von dieser Länge auf der Sonne machen? Aufl.: $t = \pi \sqrt{(l / 27 g)} = 0{,}0962$ Sec. Das Pendel schwingt also Zehntel-Secunden; überhaupt wächst die Schnelligkeit oder auch die Zahl der Schwingungen mit der Quadratwurzel aus der Schwerkraft — A. 212. Wie lang müßte ein Secundenpendel auf der Sonne sein? Aufl.: $1 = \pi \sqrt{(l / 270)}$; hieraus $l =$ nahezu 27^m. — A. 213. Wie viel würde eine vom Aequator auf den Pol versetzte Uhr täglich vorgehen? Aufl.: $3\frac{1}{2}$ Min.

Anwendung des Pendels. 1. Zur Regulirung der Uhren (Huyghens 1673). **140** Die Uhren werden entweder durch fallende Gewichte oder durch zusammengerollte Spiralfedern getrieben; nach dem Gesetze der Trägheit muß sowohl die Fallbewegung, als auch das Aufrollen der Feder immer schneller werden. Die Anwendung des Pendels verhütet diese Unregelmäßigkeit. Das Pendel ist also ebenso der Regulator der größeren Uhren, wie die Unruhe und Spirale derjenige der Taschenuhren; die Verbindung zwischen dem Regulator und dem Treibwerke nennt man die Hemmung oder das Echappement. Die gewöhnlichste Hemmung für Pendeluhren ist der Graham'sche Haken (Fig. 67). Auf der Drehachse a des Pendels p sitzt ein vförmiger Doppelhaken h, welcher abwechselnd in ein auf der Achse der

Seil- oder Federtrommel s sitzendes Rad r eingreift, wenn er durch das schwingende Pendel hin- und herbewegt wird. Hierdurch wird die Drehung der Trommel und der Fall des Gewichtes g bei jeder Schwingung einmal gehemmt, der Fall muß nach jeder Hemmung neu beginnen und geschieht daher regelmäßig. Zugleich übt das Rad bei jeder Fortbewegung einen Rückstoß auf den Haken und dadurch auf das Pendel aus, wodurch die Hindernisse der Pendelbewegung aufgehoben werden. Näheres über Uhren in der Physik des Himmel, 582.

2. **Zum Tactmessen mittels des Metronoms** (Mälzel). Das Metronom besteht aus einem kleinen Pendel mit einem festen unteren und einem verschiebbaren oberen Gewichte; der Drehpunkt ist zwischen beiden Gewichten. Das Trägheitsmoment der beiden Massen ist $md^2 + m_1 d_1^2$, das statische Moment $md - m_1 d_1$; folglich wird durch das obere Gewicht der Zähler der reducirten Länge (von x in 139.), größer, der Nenner aber kleiner; daher wird die Schwingzeit trotz der Kleinheit des Pendels ziemlich groß, etwa $1/2$ Secunde. Durch Verschiebung des oberen Gewichtes nach oben wächst der Zähler mehr, als der Nenner abnimmt, folglich wird die reducirte Pendellänge und damit die Schwingzeit größer, beim Hinabrücken kleiner. Mälzel hat das Pendel mit einer ähnlichen Einrichtung, wie Fig. 67 verbunden, wodurch nicht nur die Pendelbewegung lange erhalten, sondern auch hörbar gemacht wird. An dem Pendel ist eine Skale angebracht für das Schiebgewicht. In den musikalischen Werken steht gewöhnlich angegeben, an welche Zahl das Schiebgewicht gerückt werden muß, damit das Pendel Viertel, Achtel oder dergl. schlägt und hierdurch das vom Componisten beabsichtigte Tempo des Musikstückes feststellt.

Fig. 67.



3. **Zum Messen sehr großer Geschwindigkeiten** (Hutton 1770). Gegen den, aus einem mit Eisen beschlagenen Holzblocke von 60 bis 100 Centner bestehenden Gewichtskörper eines Pendels (ballistisches Pendel) wird eine Kugel geschossen und dadurch das Pendel zum Ausschlage gebracht. Nach den Gesetzen des Pendels und des Stoßes unelastischer Körper kann man aus der Größe des Ausschlages die Geschwindigkeit der Kugel berechnen.

4. **Zum Nachweise, daß alle Körper gleich schwer sind** (Newton 1680 und Bessel 1832). Pendel von gleicher Länge aus dem verschiedensten Stoffe angefertigt machen in gleichen Zeiten gleich viele Schwingungen, haben also gleiche Schwingzeit; folglich muß auch g d. i. die Fallbeschleunigung in 1. Sec. für alle Stoffe gleich groß sein.

5. **Zum Nachweise, daß die Schwere auf Bergen und im Erdinnern kleiner ist als auf der ebenen Oberfläche.** Ein und dasselbe Pendel macht auf einem Berge oder in einem Schachte weniger Schw. als auf der ebenen Erdoberfläche.

6. **Zum Nachweise, daß die Schwere vom Aequator nach den Polen hin zunimmt** (Richer in Paris und Cayenne 1672). Ein und dasselbe Pendel macht in gleichen Zeiten um so mehr Schw., je weiter man vom Aeq. nach den Polen hinkommt.

7. **Zum Bestimmen der Größe der Acceleration g und dadurch zum Messen der Schwerkraft der Erde.** Läßt man ein P. von beliebiger Länge l eine gewisse Zeit schwingen und zählt die Schw., so kann man die Schwingzeit t desselben finden. Dann kennt man in der Fl. (22) alle Größen bis auf g und kann daher g berechnen. Ist z. B. in Paris ein Secundenpendel $0{,}9933^m$ lang, so ergibt sich aus jener Formel $g = \pi^2 . l / t^2 = 3{,}1416^2 . 0{,}9933 : 1^2 = 9{,}808^m$ (Methode von Borda 1700, von Kater 1818).

8. **Zum Vergleichen der Schwerkraft an verschiedenen Orten.** Läßt man ein und dasselbe Pendel an verschiedenen Orten schwingen, so ist an dem einen Orte $t = \pi \sqrt{(l/g)}$ und an dem anderen $t_1 = \pi \sqrt{(l/g_1)}$ oder $t^2 = \pi^2 l/g$ u. $t_1^2 = \pi^2 l/g_1$, woraus $g : g_1 = t_1^2 : t^2 = n^2 : n_1^2$; es verhalten sich also die Schwerkräfte für die zwei verschiedenen Orte direct wie die Quadrate der Schwingungszahlen eines und desselben Pendels. Durch diese Methode hat man die früher angegebenen Unterschiede der Schwerkraft auf der Erdoberfläche gefunden und dadurch die Abplattung der Erde gemessen.

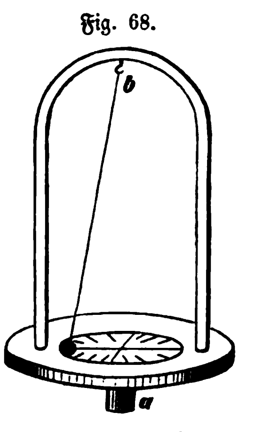
9. **Zum Wägen der Erde und hierdurch auch zum Wägen der Sonne, der Planeten u. s. w.** — Maskelyne und Hutton beobachteten 1775, um wie viel ein Pendel durch den Berg Shehallien aus seiner lothrechten Lage abgelenkt wird, und fanden hieraus die Dichte der Erde = 4,5; Cavendish (1797) ließ ein wagrechtes Doppelpendel (Drehwage) durch schwere Bleikugeln anziehen und fand hieraus die Dichte der Erde = 5,5; Carlini (1824) verglich die Länge des Secundenpendels auf dem Mont-Cenis mit derjenigen

in Bordeaux und fand hieraus die Erddichte = 4,4; Reich in Freiberg (1838) und Airy in Harton (1854) ließen Pendel auf der Erdoberfläche und in tiefen Schachten schwingen und berechneten hieraus die Dichte der Erde, der erstere = 5,5, der letztere = 6,5. Jolly schlug 1878 die Anwendung der feinsten Wagen (Empfindlichkeit $^1/_{20\,000\,000}$) vor und fand (1881) durch Benutzung einer solchen die Erddichte = 5,692. Näheres in der Physik der Erde, 538.

10. Zur Angabe der Secunden. Zu diesem Zwecke fertigt man ein sogenanntes Secundenpendel, wozu man zunächst nach der in 139. betrachteten Methode ein Reversionspendel construiren muß. Man läßt dieses z. B. eine Minute lang schwingen; die Zahl der Schw. sei n und der Abstand der Schneiden = l, die gesuchte Länge des Secundenpendels sei x. Da die Schwingungszahl desselben in 1 Min. = 60, so muß nach dem Schwingungszahlengesetze die Proportion stattfinden: $x : l = n^2 : 60^2$, woraus man x berechnen und daher ein mathematisches oder auch mit Hülfe von 139. ein physisches P. anfertigen kann, das Sec. schwingt. Hierdurch hat man erfahren, daß das Secundenpendel für verschiedene Orte der Erde eine verschiedene Länge haben muß, und daß die Länge desselben von dem Aeq. nach den Polen hin ganz allmälig zunimmt, wodurch abermals nachgewiesen wurde, daß die Schwere vom Aeq. nach den Polen hin größer wird. Auf dem Aeq., also in 0° geogr. Br. ist die Länge des Secundenpendels = 0,991^m^, in 10° = 0,9911, in 20° = 0,9917, in 30° = 0,9925, in 40° (Newyork) = 0,9931, in 50° (Mainz) = 0,9940, in 60° = 0,9949, in 70° = 0,9956, in 80° = 0,9960^m^. Als Durchschnittszahl merke man sich die leicht zu behaltende Zahl 0,9933^m^, welche ungefähr für Mailand gilt, und beachte, wie außerordentlich nahe die Länge des Secundenpendels derjenigen des Meters kommt. — Wenn man zuerst die Größe von g nach Nr. 7 für einen Ort genau bestimmt hat, so kann man auch mittels der Formel für die Schwingzeit die Länge des Secundenpendels berechnen und dadurch eine Bestätigung der obigen Werthe erhalten. Dieselben ergeben sich auch aus einer Formel, die man aus den Beobachtungen gefunden hat; ist α die geogr. Br., so ist $x = 0{,}991\,033 + 0{,}005\,638 \sin^2 \alpha$.

11. Zum Nachweise der Achsendrehung der Erde (Foucault 1851). Obwohl dieser Gegenstand in die Physik des Himmels gehört, möge er doch hier betrachtet werden, weil er eine lehrreiche Anwendung des Pendels und des Gesetzes der Trägheit ist. Wenn nämlich ein Pendel nach irgend einer Richtung in Schw. versetzt wird, und wenn keine Kraft vorhanden ist, welche die Richtung der Schw. zu ändern strebt, so muß das Pendel immer in derselben Richtung schwingen, seine Schwingungsebene muß constant bleiben. Man kann diese Folgerung aus dem Gesetze der Trägheit leicht mit dem Apparat (Fig. 68) nachweisen; derselbe wird mittels der Hülse a auf eine Schwungmaschine geschraubt und, nachdem man das Pendel in Bewegung gesetzt hat, mit beliebiger Schnelligkeit gedreht; ist diese selbst so groß, daß man den Bügel gar nicht mehr sieht, so wird das Pendel doch noch immer mit unveränderter Bewegung nach einer und derselben Stelle des Zimmers hinschwingen. Doch muß hierbei die Aufhängung in b vollkommen frei sein; wäre dies nicht der Fall, so würde sich die Drehung des Bügels dem Pendel mittheilen. Ist aber die Aufhängung frei, d. i. der Faden leicht biegsam und die Verknüpfung möglichst einfach, und ist dabei das Pendel recht schwer und lang, so wird man den Versuch stundenlang fortsetzen können, das Pendel wird immer nach einer Richtung schwingen. Ganz dasselbe würde stattfinden, wenn wir das Pendel mit der Hülse a auf den Nordpol setzen könnten; es müßte immer nach derselben Stelle des Himmels hin schwingen, während unter ihm die Erde sich täglich 1 mal dreht; folglich müßte jeden Augenblick ein anderer Meridian unter die Richtung des Pendels treten. Da wir indeß von dieser Bewegung der Erde nichts merken können, so entsteht der Schein, daß die Schwingungsebene des Pendels sich umgekehrt, also von Osten nach Westen täglich 1 mal um sich selbst drehe. Anders dagegen würde die Erscheinung sein, wenn wir auf dem Aeq. ein frei aufgehängtes Pendel schwingen ließen; denn auf dem Aeq. ist durch die Drehung der Erde kein Anlaß vorhanden, eine Veränderung der Schwingungsebene gegen die Kreise der Erde zu bewirken. Schwingt das Pendel z. B. im Aeq. selbst, so wird es immer im Aeq. schwingen, weil während der Drehung der Erde der Aeq. immer in seiner eigenen Ebene bleibt wie das Pendel auch, und es wird daher keine Veränderung des Pendels gegen den Aeq. wahrnehmbar sein. Schwingt das Pendel senkrecht gegen den Aeq., also nach dem Nord- und Südpole hin, so wird ebenfalls keine Aenderung eintreten können, weil der Aeq. immer in sich selbst bleibt und das Pendel, das immer nordsüdlich schwingen muß, dann immer auf demselben senk-

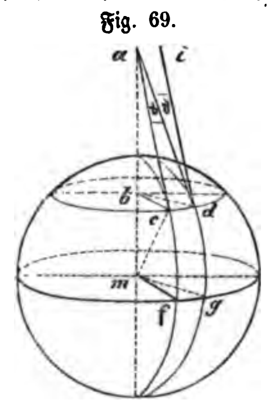
Fig. 68.



recht schwingt. Kurz am Aeq. findet keine Veränderung statt in der Stellung der Schwingungsebene gegen den Aeq. oder gegen den Meridian. Die tägliche Drehung der Schwingungsebene, welche auf dem Pole, in einer Breite von 0 Grad, 1 beträgt, ist auf dem Aeq., in einer Breite von 0 Grad, = 0, ist also an diesen Orten gleich dem Sinus der Breite. Hiernach schon möchte man vermuthen, daß die tägliche Drehung der Schwingungsebene überhaupt mit dem Sinus der geogr. Breite im Zusammenhang stehe. Nähere Untersuchung ergibt: Die tägliche scheinbare Drehung der Schwingungsebene eines Pendels ist gleich dem Sinus der geographischen Breite multiplicirt mit 360°.

Beweis: Läßt man (Fig. 69) ein Pendel in der Richtung des Meridians schwingen, so ist abc seine Schwingungsebene; ist durch die Drehung der Erde der Aufhängepunkt c nach d gekommen, so hat das Pendel noch dieselbe Richtung di ∥ ca; folglich hat es sich gegen den Meridian um den Winkel ida = dac = α gedreht, während der Punkt c selbst, dessen geogr. Breite = ∡ cmf = φ ist, sich um den Winkel dbc = β gedreht hat. Suchen wir nun eine Relation zwischen α u. β. Der Bogen cd ist sowohl = bc . π . (β / 180), sowie auch = ac . π (α / 180), folglich ist bc . β = ac . α, woraus $\alpha : \beta$ = bc : ac. Nun ist bc : ac = cos bca = sin bcm = sin cmf = sin φ. Hieraus folgt, daß $\alpha : \beta = \sin\varphi$ oder $\alpha = \beta \sin\varphi$, d. h. der Drehungswinkel der Schwingungsebene des Pendels ist gleich der gleichzeitigen Drehung des betreffenden Erdpunktes, multiplicirt mit dem Sinus der geographischen Breite. Hiermit ist unser Satz bewiesen; wenn der Erdpunkt c eine Drehung (einen täglichen Umlauf) gemacht hat, so beträgt die Drehung der Schwingungsebene nur einen solchen Theil der ganzen Drehung, wie ihn der Sinus der Breite angibt. In Berlin z. B., wo $\varphi = 52° 30'$ ist, beträgt die tägliche Drehung = 0,79335, in Mainz, wo $\varphi = 50°$, ist dieselbe = 0,76605, nahezu = $^3/_4$. Die Schwingungsebene dreht sich also in Mainz täglich nur um $^3/_4$ einer ganzen Drehung, braucht also für eine ganze Drehung $1^1/_3$ Tage. An vielen Orten wurden Rechnung und Versuch, welche die Achsendrehung der Erde zur Voraussetzung haben, angestellt, der Versuch stimmte überall mit dem Resultate der Rechnung, wodurch die Achsendrehung der Erde nachgewiesen ist. Schuller hat (1883) die Einrichtung des Versuches so gestaltet, daß man denselben in einem gewöhnlichen Zimmer anstellen und die Ablenkung schon nach wenigen Minuten wahrnehmen kann (Wied. Ann. 19. S. 249).

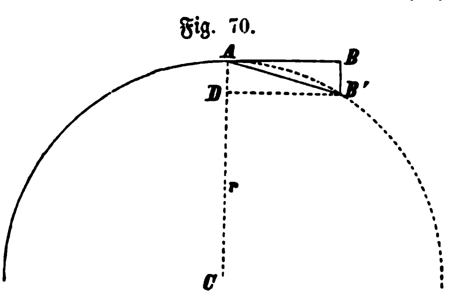
Fig. 69.



141 2. **Die Centralbewegung** (Huyghens, 1703). Unter Centralbewegung versteht man die Bewegung eines Körpers in krummliniger Bahn um einen Punkt, den Centralpunkt der Bewegung. Eine Centralbewegung ist z. B. die Bewegung des Mondes um die Erde, der Planeten um die Sonne, der Sonnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt u. s. w. Eine solche Bewegung entsteht, wenn auf einen bewegten Körper eine Kraft fortwährend einwirkt, die ihn stetig von der nach dem Gesetze der Trägheit einzuhaltenden geraden Linie ablenkt. Diese stetig ablenkende Kraft hat ihren Sitz in dem Centralpunkte oder ist wenigstens nach demselben gerichtet; sie heißt daher Centripetalkraft oder Centralkraft. Für den Mond ist es die Anziehung der Erde, für die Erde ist es die Anziehung der Sonne, welche die Centripetalkraft bildet; für eine im Kreise geschwungene Kugel liegt die Centripetalkraft in der Festigkeit der Schnur, für einen in fester krummer Bahn rollenden Körper in dem Widerstande der Bahnwand. Es ist gewiß von großem Interesse, aufzufinden, wie groß die Centripetalkraft sein muß, um einen Körper von gegebener Masse und gegebener Geschwindigkeit so von seiner geraden Bahn abzulenken, daß er eine Bahn von bestimmter Krümmung einschlägt. Die Krümmung einer Bahn mißt man durch den Krümmungsradius; es läßt sich nämlich für jeden hinreichend klein gewählten Theil einer krummen Linie ein Kreis angeben, von dem ein entsprechend kleiner Theil mit jenem kleinen Theile der krummen Linie übereinstimmt; der Radius dieses Kreises wird der Krümmungsradius jenes Curventheiles genannt. Wenn wir nun bei der Centralbewegung auch jede Curve als möglich annehmen müssen, so läßt sich doch an

jedem Punkte die Curve durch einen Kreis ersetzen; wir können daher die obige Aufgabe enger fassen: Es soll die Centripetalkraft gefunden werden, welche die mit der Geschwindigkeit v begabte Masse m zwingt, sich in einem Kreise vom Radius r zu bewegen. *Diese Centripetalkraft* $C = mv^2/r$ . . . . (23)

Fig. 70.



Beweis. Vermöge seiner Trägheit würde der Körper A (Fig. 70) den tangentialen Weg AB zurücklegen. Suchen wir zunächst, welche Kraft in C wirken müßte, damit er statt dessen die Sehne AB′ durchlaufe. Das müßte eine Kraft C sein, welche ihn zwingt, in der radialen Richtung r den Weg $BB' = AD = w$ in derselben Zeit t zurückzulegen, während welcher er in tangentialer Richtung den Weg AB durchlaufen würde. Hierbei leistet diese Kraft eine Arbeit $= Cw$ und entwickelt in dem Körper eine lebendige Kraft $\frac{1}{2} mu^2$, vorausgesetzt, daß sie in der Richtung AB eine Geschw. u hervorruft; daher ist nach den Gesetzen der lebendigen Kraft $Cw = \frac{1}{2} mu^2$, woraus $C = mu^2/2w$. Suchen wir nun für u^2 einen in w ausgedrückten Werth; nach einer Grundformel der gleichförmig beschleunigten Bewegung ist $w = \frac{1}{2} ut$, während der in der Richtung der Sehne mit der constanten Geschw. v zurückgelegte Weg $AB' = s = vt$ ist. Setzt man den hieraus gefundenen Werth für t in den für w, so folgt $w = us/2v$, woraus $u = 2vw/s$ und $u^2 = 4v^2w^2/s^2$. Um dieses s^2 zu beseitigen, benutzen wir einen bekannten geometrischen Lehrsatz, der uns die Proportion liefert $w : s = s : 2r$, woraus $s^2 = 2rw$. Wird dieser Ausdruck für s^2 in den für u^2 eingeführt, so erhält man $u^2 = 4v^2w^2/2rw = 2v^2w/r$. Nachdem so ein geeigneter Werth für u^2 gefunden ist, setzen wir denselben in den Bruch für C ein und erhalten

$$C = \frac{mu^2}{2w} = \frac{2mv^2w}{2rw} \text{ oder } C = \frac{mv^2}{r}.$$

Da dieser Ausdruck von der Länge der Sehne unabhängig ist, so gilt er auch noch, wenn die Sehne unendlich klein ist, also für die Kreisbewegung selbst.

Es ist dies dieselbe Formel, die wir in 46. für die Centrifugalkraft angegeben haben. Diese Gleichheit ist auch vollkommen begründet; denn nach dem fünften Axiom entspricht jeder Kraft eine gleiche Gegenkraft; folglich muß auch der Centripetalkraft eine gleiche Kraft entgegenwirken; es muß also in jeder sich in krummer Linie bewegenden Masse ein Druck oder Zug von dem Centralpunkte nach dem Umfange hin gerichtet, vorhanden sein, welcher genau dem entgegengesetzt gerichteten Drucke oder Zuge der Centripetalkraft gleich ist, welcher also durch dieselbe Formel ausgedrückt wird; und dieser Druck oder Zug in radialer Richtung nach außen ist eben die *Centrifugalkraft*, Fliehkraft oder Schwungkraft. *Centripetalkraft und Centrifugalkraft sind gleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte.* Die Centrifugalkraft ist einfach eine Folge der Trägheit, vermöge welcher ein in krummer Bahn bewegter Körper an jedem Punkte in der Richtung der Bahntangente mit seiner ursprünglichen lebendigen Kraft fortzugehen strebt. Diese lebendige Kraft erzeugt also den Druck nach auswärts, die Centrifugalkraft: die an einer Schnur im Kreise geschwungene Kugel strebt, die Schnur zu zerreißen; Wagen, die schnell um eine wenig stumpfe Ecke fahren, sind in Gefahr nach außen hin umzustürzen; Bahnzüge, die in stark gekrümmten Curven fahren, drohen auszugleisen, wogegen man sie dadurch schützt, daß man den inneren Schienenstrang tiefer legt und dadurch eine Componente des Gewichtes zur Centripetalkraft macht. Kunstreiter, die schnell im Circus reiten, können nach außen geschleudert werden, wenn sie sich nicht durch eine Componente ihres Gewichtes schützen, indem sie sich nach innen biegen; ein Glas Wasser kann, im Kreise geschwungen, eine umgekehrte Lage haben, ohne daß das Wasser ausläuft; in der Centrifugalrutschbahn ist man oft mit dem Kopfe unten, ohne herauszufallen. In allen diesen und vielen anderen Erscheinungen ist ein von der lebendigen Kraft erzeugter Druck oder Zug nach außen vorhanden, die Centrifugalkraft, welche nach dem fünften Axiom der Centripetalkraft gleich ist; folglich ist die Centrifugalkraft $F = mv^2/r$ . . . . (23)
d. h. *die Centrifugalkraft ist direct proportional der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, aber umgekehrt proportional dem Krümmungsradius der Bahn.*

Man weist diesen wichtigen Satz mit der Schwungmaschine nach, in welcher eine Achse durch eine Räderübersetzung in rasch rotirende Bewegung versetzt wird; auf diese Achse schraubt

man Gefäße, die unten schwerere Stoffe enthalten; beim raschen Drehen gehen dieselben nach oben oder nach außen (der Quecksilbergürtel). Ein aufgeschraubtes Gestell trägt auf einem Drahte 2 lose Kugeln, die durch eine Schnur verbunden sind; ist die eine Kugel doppelt so schwer wie die andere, aber dem Mittelpunkte zweimal näher als diese, so bleiben die Kugeln selbst bei der schnellsten Drehung stehen, womit die drei Theile des Satzes nachgewiesen sind. Man kann mit dieser Maschine auch die Richtigkeit der Formel selbst nachweisen; siehe A. 72.

Fig. 71.



Hierzu benutzt man den Apparat Fig. 76, der auf die Schwungmaschine geschraubt wird. Die Massen, ihre Entfernung vom Centrum, also der Radius r, ihre Geschw. v sind aus dem Apparat zu entnehmen und in die Fl. einzusetzen; bei F wird ein Gewicht, gleich der berechneten Centrifugalkraft aufgesetzt; dann wird dasselbe gehoben, wenn die Maschine in die gehörige Drehung versetzt wird. Mittels zweier Apparate wie Fig. 71, die man auf 2 Treibrollen der Maschine setzt, lassen sich auch die 3 Theile des Gesetzes einzeln nachweisen. Ist die eine Treibrolle doppelt so groß wie die andere, die eine Masse m aber ebenso groß und so weit entfernt wie die andere, so dreht sich die Masse doppelt so schnell wie die andere, — und hebt dann das 4 fache Gewicht. Befestigt man auf dem Apparat mit der doppelt so großen Treibrolle die gleiche Masse m in der halben Entfernung, so haben beide Massen dieselbe Geschw., — aber die mit der halben Entfernung, dem halben Radius hebt das doppelte Gewicht. Sind die Treibrollen und Radien gleich, ist aber das eine m doppelt so groß als das andere, — so hebt jenes das doppelte Gewicht.

Die Centrifugalkraft hat viele Anwendungen: der Centrifugalregulator an Dampfmaschinen, das Centrifugalpendel an Uhren, die Centrifugaltrockenmaschine, die Centrifuge in Zuckerfabriken, die Centrifugalpumpe, die Schleuder, der Lasso, die Centrifugalrutschbahn, der Ventilator u. s. w. In der Wissenschaft erklärt man die abgeplattete Gestalt der Erde (1719 gegen 1713 Meilen) und der anderen Planeten, sowie die Abnahme der Schwere von den Polen gegen den Aequator hin durch die Centrifugalkraft. Der letztere Gegenstand wurde schon in 78. besprochen. Daß die Abplattung der Erde durch die Schwungkraft entstanden sein könne, sucht man durch eine aus losen Blechringen angefertigte Kugel nachzuweisen, die man auf der Schwungmaschine durch Rotiren leicht zum Abplatten bringen kann, sowie durch den Plateau'schen Versuch, eine in Flüssigkeit schwebende Oelkugel, die sich stark abplattet, wenn man sie mittels einer durchgesteckten Achse in Rotation versetzt. Neuere Geologen erklären die Abplattung durch die Wirkung von Polargletschern, weil sie den feurig flüssigen Urzustand der Erde nicht zugeben wollen; diese Erklärung geschieht jedoch ebenfalls durch die Centrifugalkraft, indem diese Geologen annehmen, daß das Weltmeer eine abgeplattete Kugel bilde.

Die Centrifugalkraft gibt ein lehrreiches Beispiel über den engen Zusammenhang zwischen lebendiger Kraft und Druckkraft; denn die Centrifugalkraft ist ein Druck, der durch eine lebendige Kraft hervorgebracht wird. Sie zeigt aber auch, daß ein Druck für sich allein keine Bewegung hervorbringen kann; denn das von dem geschwungenen Faden sich losreißende Gewicht bewegt sich nicht in radialer Richtung, sondern in tangentialer Richtung weiter; die Centrifugalkraft ist also keine Arbeitskraft, sie ist in jedem Punkte der Bahn nur ein momentaner Druck, der in radialer Richtung keine Bewegung erzeugen kann. Setzen wir in den Ausdruck für die Arbeit Cw der Centrifugalkraft $C = mv^2 / r$ und $w = s^2 / 2r$, so ergibt sich $Cw = mv^2 s^2 / 2r^2$. Lassen wir auch hier, um auf die Kreisbewegung überzugehen, $s = 0$ werden, so ergibt sich die Arbeit $Cw = 0$, womit bewiesen ist, daß die Centrifugalkraft keine Arbeit leistet. Daß bei den physikalischen Schwungmaschinen dennoch radiale Bewegungen entstehen, hat in den Rückwirkungen der dabei mitwirkenden festen Körper seinen Grund.

Man kann in die Fl. (23) für die Centrifugalkraft statt der Geschw. v die Umlaufzeit t einführen. In dieser Zeit t durchläuft nämlich der Körper den Weg $2\pi r$, wenn seine Bahn kreisförmig ist; daher legt er in 1 Sec. den Weg $v = 2\pi r / t$ zurück. Setzen wir diesen Werth in Formel (23) statt v ein, so entsteht $F = 4\pi^2 rm / t^2$ . . . . (24)

Es liegt kein Widerspruch darin, daß nach dieser Formel die Schwungkraft dem Radius direct, nach (23) aber umgekehrt proportional ist; denn das erste findet nur statt, wenn die Geschwindigkeiten dieselben sind, und das letzte, wenn die Umlaufzeiten gleich bleiben.

Gesetze der freien Centralbewegung (Kepplers Gesetze 1609). Eine freie Centralbewegung ist eine solche, die ein frei im Weltraume schwebender Körper beschreibt, wenn er eine gewisse lebendige Kraft in sich trägt, und wenn er durch die Anziehung eines anderen Körpers stetig von der geraden Linie abgelenkt wird, die er der Trägheit gemäß durch seine lebendige Kraft beschreiben müßte. Die Tangentialkraft, d. i. die Kraft, mit welcher der Körper in der Richtung der Bahntangente weiter zu gehen bestrebt ist, und die Centrifugalkraft eines Weltkörpers beruhen demnach in der lebendigen Kraft, die er durch eine uns noch unbekannte Ursache erhalten hat, und die er durch sich selbst weder vernichten, noch vermehren kann; die Centripetalkraft eines Weltkörpers beruht in der Anziehung eines oder mehrerer anderen Weltkörper. 142

1. Ein Weltkörper muß sich vermöge seiner lebendigen Kraft und der Anziehung anderer Weltkörper in krummer Linie um den Mittelpunkt der Anziehung bewegen. Man zeigt dies gewöhnlich auf folgende Weise: Wenn wir vorerst annehmen, daß die in c (Fig. 72) wirksame Centripetalkraft ruckweise wirke und den Weltkörper a in derselben Zeit durch den Weg ai zu ziehen vermöge, in welcher er durch seine Tangentialkraft den Weg ah zurücklegen würde, so muß nach dem Parallelogramm der Kräfte geschlossen werden, daß der Körper durch das Zusammenwirken der beiden Kräfte den Weg ab zurücklegen, also am Ende jener Zeit in b anlangen müßte. In gleicher Weise würde er nun den Weg bk = ab beschreiben; da er aber durch die Anziehung in derselben Zeit den Weg bl nach c hin durchlaufen muß, so wird er nach derselben Schlußweise wie vorhin, den Weg bd zurücklegen, und ebenso in einer gleichen Zeit den Weg df. Man sieht hieraus, daß der Körper sich zwar immer von dem Centralpunkte zu entfernen strebt, daß er aber durch dessen Anziehung daran gehindert wird und sich daher um denselben bewegen muß. Wenn die Anziehung nicht ruckweise, sondern stetig wirkt, so wird auch die Richtungsänderung nicht plötzlich, sondern stetig vor sich gehen, es wird also die Bahn nicht eine vieleckige, sondern eine krumme Linie sein. Da die Anziehung der Weltkörper wirklich constant wirkt, so sind folgerichtig die Bahnen der Weltkörper krumme Linien. — Dieses erste Gesetz haben wir erhalten, ohne über die beiden Kräfte Wirkungsgesetze vorauszusetzen. Die Wirkungsgesetze derselben sind uns indessen schon bekannt. Aus diesen Gesetzen kann man mittels der Analysis die Gestalt der Bahnen der Weltkörper berechnen. Da wir aber diese Wissenschaft hier nicht benutzen können, so soll nur das gesetzmäßige Resultat der Rechnung angeführt werden: Wenn die Anziehung nach Newtons Gravitationsgesetz auf einen durch seine lebendige Kraft fortgetriebenen Körper einwirkt, so ist dessen Bahn ein Kegelschnitt: eine Ellipse, eine Parabel oder eine Hyperbel. Mathematisch bewiesen wurde dieses Gesetz zuerst von Newton, aber aufgefunden wenigstens im Princip für die Planeten, wurde es schon von Keppler und lautet in Kepplers Form: Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. Es bildet in dieser Form das zweite der drei Keppler'schen Gesetze, welche die Grundlage der neueren

Fig. 72.

Astronomie geworden sind; denn auch Newtons Gravitationsgesetz ergab sich erst aus diesen Gesetzen, während man jetzt umgekehrt Kepplers Gesetze aus jenem allgemeineren Grundgesetze ableitet. Nach dieser Ableitung ist also die Bahn jedes Weltkörpers eine der drei Kegelschnittlinien. Welche von diesen drei Linien aber ein Weltkörper beschreibt, hängt offenbar von dem Verhältnisse seiner lebendigen Kraft zu der centralen Anziehung ab. Wäre z. B. die lebendige Kraft verschwindend klein gegen die Anziehung, so würde der Körper in gerader Linie in den Centralkörper stürzen; wäre dagegen die Anziehung verschwindend klein gegen die lebendige Kraft des Körpers, so würde sich derselbe in gerader Linie fort von dem Centralpunkte ins Unendliche bewegen. Wenn der Körper sich in kreisförmiger Bahn um den Centralpunkt bewegen sollte, wenn also die Centralkraft ma constant wäre, so müßte auch die derselben gleiche Centrifugalkraft mv^2/r constant sein; es müßte also immer $mv^2/r = ma$ sein, oder $\frac{1}{2}mv^2$ müßte sein $= \frac{1}{2} . ma . r$; es findet also Kreisbewegung statt, wenn die lebendige Kraft gleich dem halben Product der Anziehung mit dem Abstande des Körpers vom Centralpunkte ist. Ebenso ergibt höhere Rechnung im einfachen Anschlusse an die letzte Bemerkung Folgendes: Wenn die lebendige Kraft des Weltkörpers in seinem kleinsten Abstande von dem Centralpunkte kleiner ist als das Product dieses Abstandes mit der Anziehung, so ist die Bahn des Weltkörpers eine Ellipse, von der die Kreisbewegung als specieller Fall erscheint. Ist die lebendige Kraft aber gleich dem Product des

143

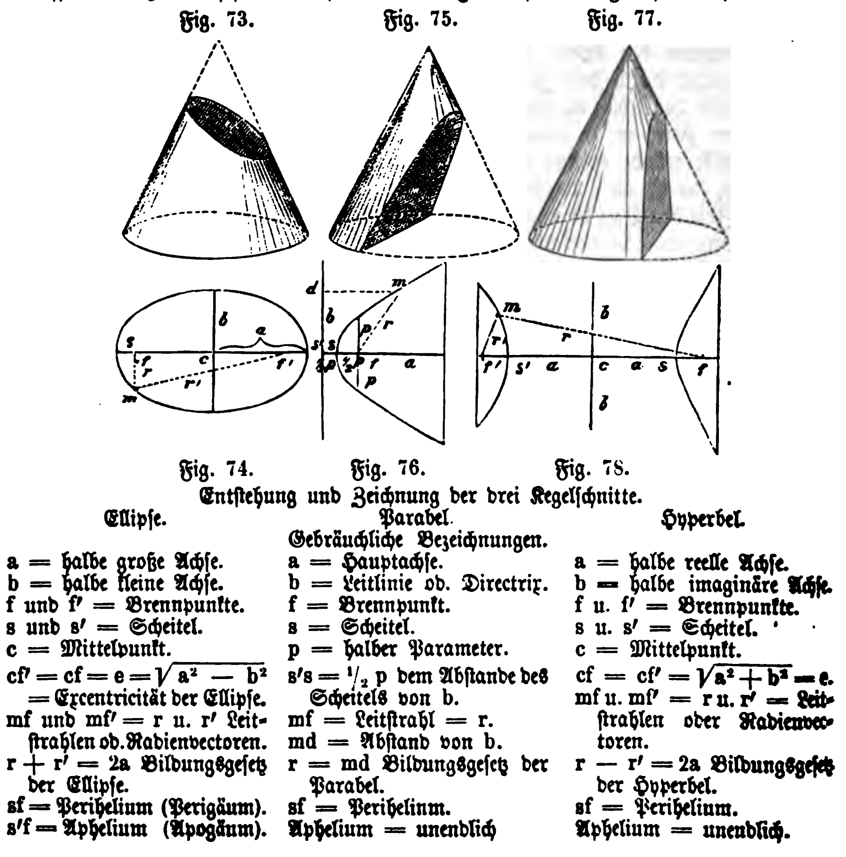


Fig. 73. Fig. 75. Fig. 77.

Fig. 74. Fig. 76. Fig. 78.

Entstehung und Zeichnung der drei Kegelschnitte.

Gebräuchliche Bezeichnungen.

Ellipse.	Parabel.	Hyperbel.
a = halbe große Achse.	a = Hauptachse.	a = halbe reelle Achse.
b = halbe kleine Achse.	b = Leitlinie od. Directrix.	b = halbe imaginäre Achse.
f und f′ = Brennpunkte.	f = Brennpunkt.	f u. f′ = Brennpunkte.
s und s′ = Scheitel.	s = Scheitel.	s u. s′ = Scheitel.
c = Mittelpunkt.	p = halber Parameter.	c = Mittelpunkt.
$cf' = cf = e = \sqrt{a^2 - b^2}$ = Excentricität der Ellipse.	$s's = \frac{1}{2}$ p dem Abstande des Scheitels von b.	$cf = cf' = \sqrt{a^2 + b^2} = e$.
mf und mf′ = r u. r′ Leitstrahlen od. Radienvectoren.	mf = Leitstrahl = r.	mf u. mf′ = r u. r′ = Leitstrahlen oder Radienvectoren.
	md = Abstand von b.	
r + r′ = 2a Bildungsgesetz der Ellipse.	r = md Bildungsgesetz der Parabel.	r — r′ = 2a Bildungsgesetz der Hyperbel.
sf = Perihelium (Perigäum).	sf = Perihelinm.	sf = Perihelium.
s′f = Aphelium (Apogäum).	Aphelium = unendlich	Aphelium = unendlich.

$$\frac{r}{t^2} : \frac{r_1}{t_1^2} = r_1^2 : r^2 \text{ oder } \frac{t^2}{r} : \frac{t_1^2}{r_1} = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r^2} \text{ oder } \frac{t^2}{r} : \frac{t_1^2}{r_1} = r^2 : r_1^2$$

oder, wenn man beiderseits mit $r : r_1$ multiplicirt

$$t^2 : t_1^2 = r^3 : r_1^3 \text{ (q. e. d.)}$$

Während die zwei ersten Keppler'schen Gesetze sich nur auf einen Weltkörper beziehen, uns Aufschluß geben über die Bahnform und die Bewegungsart eines Weltkörpers für sich ohne Beziehung auf andere, zeigt uns das dritte Gesetz einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Weltkörpern, die zu einem und demselben Centralkörper gehören; wir sind im Stande, mittels dieses Gesetzes die Entfernung und dadurch die Bahn und die Geschw. eines Planeten zu berechnen, wenn wir nur seine Umlaufzeit kennen, welche ja leicht am Himmel zu beobachten ist, und wenn uns diese beiden Elemente von irgend einem anderen Planeten bekannt sind. Der Jupiter z. B. hat eine Umlaufzeit von 11 Jahren; folglich verhalten sich die Quadrate der Umlaufzeiten von Erde und Jupiter wie 1 : 121; ebenso verhalten sich auch die Cuben der ganzen und halben Bahnachsen; folglich verhalten sich die halben Bahnachsen selbst wie 1 : 5; d. h. der Jupiter ist 5 mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde. Da nun die Planetenbahnen nahezu Kreise sind, so ist die Jupiterbahn 5 mal länger als die Erdbahn; für diese 5 mal längere Bahn braucht der Jupiter eine 11 mal längere Zeit, sonach ist seine Geschwindigkeit $^{11}/_5$, etwa 2 mal kleiner als die der Erde, = 2 M. — Unter der Voraussetzung, daß die Planetenbahnen Kreise seien, läßt sich aus dem dritten Gesetze ein allgemeiner Satz über die Geschw. der Planeten ableiten. Diese Geschw. sind $v = 2\pi r / t$ und $v_1 = 2\pi r_1 / t_1$; daher $v : v_1 = r/t : r_1/t_1$. Erhebt man diese Gleichung zum Quadrat und verbindet sie mit der obigen, die das dritte Keppler'sche Gesetz ausspricht, so erhält man $v^2 : v_1^2 = r_1 : r$, woraus $v : v_1 = \sqrt{r_1} : \sqrt{r}$, d. h. die Geschwindigkeiten zweier Planeten verhalten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln der mittleren Abstände von der Sonne. Der Saturn z. B. ist mehr als 9 mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde; daher ist seine Geschw. mehr als 3 mal kleiner wie die der Erde, ca 1,3 M.

Aufg. 214. Die Erde hat eine Geschw. von 4,1 M., wie groß müßte ihre Geschw. sein, damit ihre Bahn a) eine Parabel, b) ein Kreis würde? And.: Für den ersten Fall muß nach 142. sein $^1/_2 mv^2 = ma . r$, worin a die von der Sonne auf die Erde ausgeübte Acceleration bedeutet; auf der Sonne selbst ist die Acceleration 9,808 . 27. Die Erde ist vom Mittelpunkte der Sonne 20 000 000 / 95 000 = 211 mal weiter entfernt als ein Punkt der Sonnenoberfläche; folglich ist $a = 9{,}808 . 27 / 211^2 = 0{,}0059^m$. Daher ist $v^2 = 2ra = 2 . 20\,000\,000 . (0{,}0059 / 7420) = 32$, woraus $v = 5{,}7$ M. Ebenso ergibt sich für den Kreis $v = 4$ M. — A. 215. Die kleinste Entfernung des Merkur ist 6 200 000 M., die mittlere 7 750 000 M.; wie groß müßte seine Perihelgeschw. sein, damit er a) eine Parabel, b) einen Kreis beschriebe? Aufl.: a) $v = 7{,}9$ M; b) $v = 5{,}6$ M. — A. 216. Das Aphel des Encke'schen Kometen = 40 Mill. M., das Perihel = 3 Mill. M.; wie groß ist die Geschw. im Aphel, wenn die im Perihel = 12 M. beträgt? Aufl.: 0,9 M. — A. 217. Im Aphel der Erde erscheint die Sonne mit einem Durchm. von 1890 Sec., im Perihel mit 1960 S.; wie groß ist die stündliche Bewegung im Winter, wenn sie im Sommer 148 Sec. beträgt? Aufl.: 153″. — A. 218. Die Entfernung des Merkur ist 8 Mill. ca., die des Saturn 200 Mill. Meilen; wie groß ist die Geschw. des Saturn, wenn die des Merkur = 6,4 M. ist? Aufl.: 1,3 M. — A. 219. Die Umlaufzeiten von Neptun und Merkur sind 60 177 und 88 Tage; wie weit ist der erstere von der Sonne entfernt? Aufl.: $(60\,177/88)^{2/3} . 8 = 620$ Mill. M. — A. 220. Wenn die Entfernung des Jupiter und des Saturn von der Sonne 104 und 190 Mill. M. betragen und die Umlaufzeit des ersteren 12 Jahre ist, wie groß ist die des letzteren? Aufl.: 29,63 Jahre.

147

Freie Achsen. Präcession. Nutation. Eine freie Achse ist eine solche, welche durch keine Kraft, keine mechanische Einrichtung in ihrer Richtung festgehalten wird, welche sich also nach jeder Richtung bewegen kann. Eine freie Achse findet sich z. B. in einem tanzenden Toppich oder Brummkreisel, in einem Scheibenkreisel wie etwa an einem tanzenden Knopfe, an einem tanzenden oder rollenden Geldstücke, an einem frei dahin rollenden Rade; freie Achsen sind die Drehachsen aller Weltkörper. Nachgeahmt ist die freie Achse eines Weltkörpers in Bohnenbergers Maschinchen, Fig. 81. In dem festen Ringe A kann sich der Ring B um eine vertikale Achse und in diesem der Ring C um eine horizontale Achse drehen, so daß die Drehachse der in dem Ringe C drehbaren Kugel jede beliebige Richtung annehmen kann. Auch in dem Fessel'schen Rotationsapparate (Fig. 82) ist die Achse

148

eines Weltkörpers, daß wir denselben als gerade ansehen dürfen, so ist $\triangle$ abc der von dem Radius vector ac während der Zeit dieser Bewegung beschriebene Flächenraum. In gleicher Zeit würde der Weltkörper danach den gleichen Weg bk = ab durchlaufen, wenn er nur seiner Trägheit folgen würde; durch Mitwirkung der Centripetalkraft aber gelangt er nach d; folglich beschreibt der Radius vector den Raum bdc. Es ist nun leicht zu zeigen, daß abc = bcd; denn $\triangle$ abc = $\triangle$ bkc, als Dreiecke, welche gleiche Grundlinien in einer und derselben Geraden und ihre Spitzen in einem Punkte haben. Ebenso ist auch $\triangle$ bdc = $\triangle$ bkc, weil sie dieselbe Grundlinie bc und ihre Spitzen in einer zur Grundlinie Parallelen kd haben. Folglich ist $\triangle$ abc = $\triangle$ bdc, womit das zweite Gesetz für kleine Flächenräume, sowie durch Summation solcher auch für größere bewiesen ist.

Fig. 79.

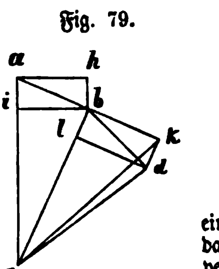
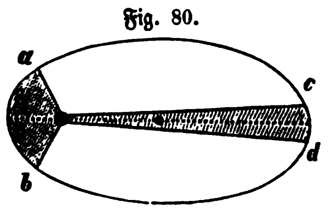


Fig. 80.

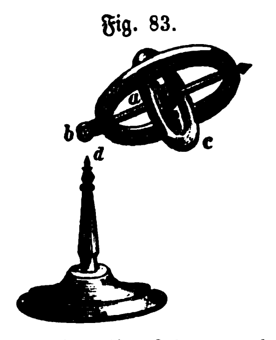


Dieses Gesetz, das erste der drei Keppler'schen Gesetze, macht es nicht blos möglich, die Stellung eines Planeten, Kometen u. s. w. für jede beliebige Zeit zu berechnen, wenn man einmal die Bahnelemente eines solchen Weltkörpers kennt, sondern es sagt uns auch sofort, daß ein sich im Kreise bewegender Körper immer dieselbe Geschw. hat, daß aber die Geschw. eines in elliptischer Bahn fortschreitenden Körpers eine verschiedene ist; und zwar ist für Planeten, Kometen, Sternschnuppen und Schwärme die Geschw. am größten im Perihel, am kleinsten im Aphel, und nimmt vom Aphel zum Perihel hin stetig zu. Denn im Perihel ist (Fig. 80) bei einer sehr gestreckten Ellipse der in einer gewissen Zeit beschriebene Flächenraum kurz, im Aphel aber lang; damit nun beide denselben Inhalt haben, muß der erstere breit, der letztere schmal sein; folglich muß der im Perihel in gewisser Zeit zurückgelegte Weg ab viel größer sein, als der im Aphel in derselben Zeit durchlaufene Weg cd. Für Planeten kann der Unterschied nur ein geringer sein, weil sie nur kreisähnliche Ellipsen beschreiben; indessen ist der Unterschied doch groß genug, um die wahren Sonnentage merklich ungleich zu machen, bei uns im Winter länger als im Sommer. Für die Kometen ist der Unterschied groß, oft sehr bedeutend, wegen der lang gestreckten Formen ihrer Bahnen. Denn haben sie auch im Perihel eine noch so große Geschw., ist aber das Aphel 10, 20, 30... mal größer, so ist hier auch die Geschwindigkeit 10, 20, 30 . . . mal kleiner; dies ist der Grund, warum die Kometen überhaupt eine größere Umlaufzeit als die Planeten, manche aber gar Umlaufzeiten von Tausenden von Jahren haben. — Die kleine Geschw. im Aphel macht es erklärlich, daß ein Komet aus unendlicher Weite wieder in die Nähe der Sonne zurückkehrt; denn jene kleine Geschw. hat eine so kleine Tangentialkraft zur Folge, daß die Anziehung trotz der großen Entfernung überwiegend wird und den Kometen wieder herbeiführt; ebenso erklärt die große Geschw. im Perihel und die daraus resultirende überwiegende Tangentialkraft, daß der Komet trotz der großen Anziehung der so nahen Sonne nicht in dieselbe stürzt, sondern wieder ins Unendliche hinaus zieht. — Die durch Abnahme der Geschw. herbeigeführte Abnahme der lebendigen Kraft scheint dem Princip der Erhaltung der Kraft zu widersprechen; in Wirklichkeit ist sie aber diesem Princip gemäß. Denn indem sich der Weltkörper von dem Centralkörper entfernt, vollbringt er eine Arbeit, weil er die entgegenwirkende Anziehuug überwindet; für diese Arbeit ist ein Verbrauch von lebendiger Kraft nöthig. Aber diese von dem Weltkörper aufgenommene Arbeit wird wieder in lebendige Kraft verwandelt, wenn er sich dem Centralkörper nähert, und zwar genau in den verbrauchten Betrag; denn im Perihel angelangt, hat der Körper wieder die vorige Geschw. und die vorige lebendige Kraft. — Aus dem 2. Gesetze folgt auch, daß unser Sommerhalbjahr länger ist als unser Winterhalbjahr, sowie endlich die Zeitgleichung (14).

146 3. Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Cuben der großen Bahnachsen. — Beweis: Bezeichnen wir die Centripetalkräfte zweier Weltkörper mit k und k_1, ihre mittleren Entfernungen von dem Centralkörper (halbe große Bahnachsen) mit r und r_1, so ist nach Newtons Gravitationsgesetz $k : k_1 = r_1^2 : r^2$. Da die Centrifugalkräfte den Centripetalkräften gleich sein müssen, so haben wir nach Formel (24) auch $k : k_1 = r/t^2 : r_1/t_1^2$; hieraus folgt

setzen, die Achse bleibt immer der ersten Lage parallel. So bleiben auch die Achsen der Weltkörper immer in ihrer Richtung, wenn der Körper noch so schnell und mannichfaltig durch den Weltraum fortläuft; so zeigt unsere Erdachse immer gegeu den bekannten Nordpolarstern und erhält dadurch den Wechsel der Jahreszeiten in alter Weise constant. Besonders auffallend zeigt sich der Widerstand gegen jede Aenderung der Achsendrehung an dem Maschinchen, sowie an Fessels Rotationsapparat (Fig. 82), an welchem eine ganze Reihe interessanter Versuche gemacht werden kann, und an einer einfachen Abänderung desselben, an **Foucaults Gyroskop** ($\gamma\tilde{v}\varrho o\varsigma$ = Kreis) (Fig. 83). Wenn an Fessels Apparat die Scheibe A in rasche Drehung versetzt worden ist, so kann man das Gegengewicht P sogar wegnehmen, ohne daß der ganze schwere Theil ABCD sich senkt. Hat man die Scheibe c des Gyroskops in Rotation versetzt, so kann man die ganze Einrichtung mittels des Pfännchens b auf die Spitze d setzen, ohne daß sie sinkt. Hier ist also wegen der großen Masse und wegen der großen Geschwindigkeit der Hauptmasse in dem Ringe das Beharrungsvermögen so groß, daß die verticale Componente desselben das Gewicht der ganzen Einrichtung im Gleichgewichte hält, ja bei rascher Drehung sogar etwas nach aufwärts dreht. In ähnlicher Weise stellt sich ein schief stehender Kreisel von selbst wieder senkrecht auf, wenn er nur rasch genug rotirt. Versucht man es, an den drei Apparaten mit der Hand die Achse zu verändern, so spürt man sofort einen merklichen Widerstand, ein zurückstoßendes Widerstreben der Maschine. An dem **Schmidt'schen** Kreisel (Fig. 84) tritt die Beharrung der Achsen besonders auffallend hervor, da hier an die Achse cd sogar noch ein Gewicht gehängt werden kann; dieser Apparat ist auch deßhalb empfehlenswerth, weil er vermöge der Hülse rechts von c, mit der die Scheibe ab ein Ganzes bildet, leicht in Gang zu setzen ist, und weil er in manchen Fällen die Schwungmaschine ersetzen kann.

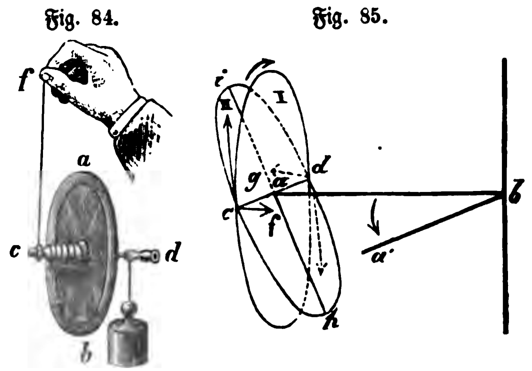
Fig. 83.



150

2. Wenn auf einen um eine freie Achse sich drehenden Körper eine nicht allzu große Kraft einwirkt, welche die Richtung der Achse zu ändern strebt, so ändert sich der Winkel der Achse gegen die Hauptachse des ganzen Systems nicht, wohl aber ihre Stellung, indem die Achse mit unverändertem Winkel gegen die Hauptachse eine Kegelfläche um dieselbe beschreibt.

Fig. 84. Fig. 85.



Beweis nach Poggendorff. Wir führen denselben am einfachsten an dem Gyroskop. Es sei I (Fig. 85) die mit der Achse ab drehbare Scheibe, welche durch eine Kraft in die Lage II gebracht werde. Die Theilchen der Scheibe z. B. c und d haben das Bestreben, in der früheren Richtung weiter zu gehen, werden demnach von Kräften in den durch vertikale Pfeile angedeuteten Richtungen gezogen. Die Kraft bei c wirkt diesseits, die Kraft bei d jenseits der neuen Lage der Scheibe schief gegen dieselbe; diese Kräfte enthalten daher jedenfalls senkrechte Componenten cf und dg, welche an der Scheibe von entgegengesetzten Seiten ziehend wirken, und sie daher um den Durchmesser ih zu drehen streben. Dadurch erhält die Scheibe eine in der Figur nicht gezeichnete Lage, durch welche die jetzt sichtbare Seite allmälig verschwindet und die Hinterseite sichtbar wird, sie rückt also aus der vorigen Lage gegen den Beschauer hin und mit ihr kommt die Achse in die Lage ba'; sie dreht sich um die vertikale Achse b.

Bei dem Gyroskop wird die drehend wirkende Veränderung der Lage in jedem Augenblicke durch das sehr bedeutende Gewicht des ganzen seitlich hängenden Apparates erzielt; die Geschwindigkeit der Drehung muß daher auch sehr bedeutend und dadurch besonders auffallend sein. An dem Fessel'schen Apparat kann man durch Verschieben des Gegengewichtes P das Uebergewicht bald auf die eine, bald auf die andere Seite bringen und daher die Drehung wechseln, vermehren oder vermindern, oder auch ganz aufheben. Am interessan-

der Scheibe A eine freie, ebenso wie in der Schiffslampe die Achse der Lampe. Für die freien Achsen gelten folgende Gesetze: 1. **Gehört die freie Achse einem ruhenden Körper an, so kann sie durch die kleinste Kraft aus ihrer Richtung gebracht werden. Ist sie aber die Drehachse**

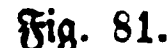
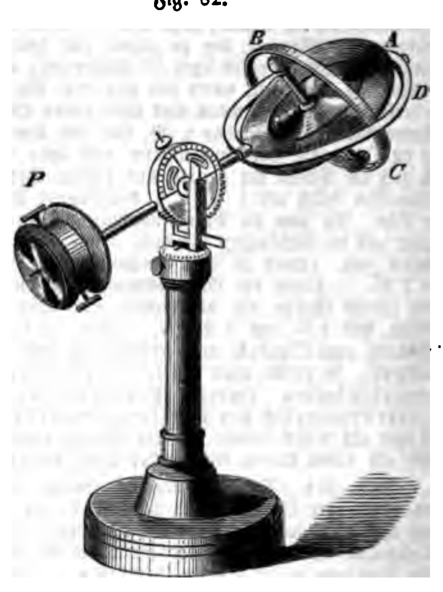


Fig. 81.



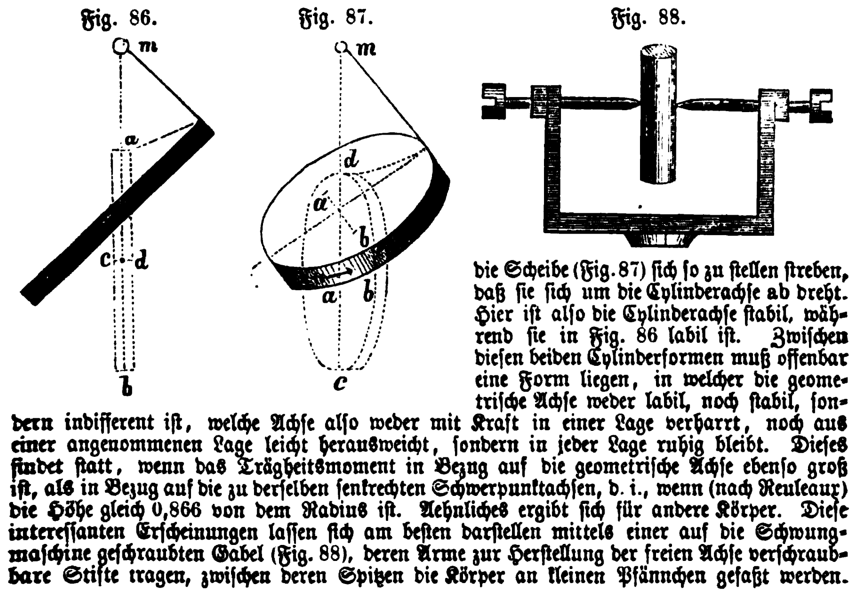
Fig. 82.



eines rotirenden Körpers, so verharrt sie mit einer Kraft in ihrer Richtung, welche mit der Masse und der Geschwindigkeit des sich drehenden Körpers wächst. Der erste Theil des Satzes ergibt sich sofort aus der Definition der freien Achse. Für den zweiten Theil muß zuerst gezeigt werden, daß durch die Drehung die Achse nicht unfrei wird. Zwar zieht jedes Molekül des Körpers dadurch an der Achse, daß es eine Centrifugalkraft hat; allein in einem regelmäßig um die Achse geformten Körper von gleichartiger Masse wird jeder Zug nach einer Seite hin durch einen gleichen und entgegengesetzten Zug aufgehoben, den ein in gleicher Lage jenseits der Achse befindliches Molekül ausübt. Demnach wird in einem regelmäßigen Körper durch die Drehung kein Druck auf die Achse erzeugt; dieselbe bleibt frei. Aber gerade so, wie jedes Molekül vermöge der Trägheit in seiner Richtung zu verharren strebt, gerade so muß auch jedes Molekül vermöge der Trägheit in seiner Drehungsebene verharren und demnach einen Widerstand ausüben, wenn eine Kraft es aus seiner Ebene heraus zu bewegen strebt. Dies ist aber der Fall, wenn man die Achse aus ihrer Richtung bringen will; alle Moleküle setzen dann einen Widerstand entgegen, der folglich um so größer ist, je mehr Moleküle vorhanden sind, je größer also die Masse des Körpers ist, und je schneller sich die Moleküle bewegen.

149 Ruhende, auf der Spitze stehende Kreisel aller Art fallen sofort um, weil sie in labiler Ruhe sind; ein tanzender Kreisel fällt nicht, selbst nicht, wenn er schief steht. Ruhende Scheiben, wie Räder, Geldstücke und Reifen &c. fallen leicht um, wenn sie auf der Peripherie stehen, fallen aber nicht, wenn und so lange sie auf der Peripherie rollen oder tanzen. Bringt man die Kugel an Bohnenbergers Maschinchen durch eine um ihre Achse geschlungene Schnur in rasche Drehung, so kann man das Maschinchen wenden, drehen und stürzen, wie man will, man kann es auf der Scheibe einer Schwungmaschine in rascheste Bewegung

bewegen. Aber auch diejenigen Schwerpunktachsen, welche der genannten Bedingung genügen, zeigen bei der Drehung ein verschiedenes Verhalten, je nachdem das Trägheitsmoment ein Maximum oder ein Minimum ist. Für den letzteren Fall ist nämlich auch die Centrifugalkraft aller Körpertheilchen zusammen ein Minimum; daher muß dieselbe größer werden, sowie die Achse nur die kleinste Veränderung erleidet und dadurch unfrei wird; durch die Centrifugalkraft erleidet sie dann einen Druck, und wird dadurch immer mehr aus ihrer Lage gebracht, bis sie endlich in diejenige Lage gelangt, wo die Centrifugalkraft ein Maximum ist; gewöhnlich ist dann hier auch das Trägheitsmoment ein Maximum, die Achse ist wieder frei und muß bei jeder Veränderung wieder in diese Lage zurückkehren. In dieser Lage ist also die freie Achse stabil, hier gehorcht sie den angeführten zwei Gesetzen. In der vorigen Lage dagegen war sie labil frei, wobei sie dem zweiten Gesetze nicht folgen kann. — Es hängt von der Körperform ab, ob eine Drehachse stabil oder labil frei ist; für die Kugel sind alle Durchmesser stabil freie Achsen. Nach Reuleaux, welcher 1858 diese Erscheinungen näher untersucht hat, ist in einem Cylinder die geometrische Achse nur dann stabil, wenn die Höhe kleiner ist als $\frac{1}{2}\sqrt{3}$ oder 0,866... multiplicirt mit dem Radius; ist die Höhe größer als dieser Theil des Radius, so ist jene Achse labil; stabil ist dann eine derjenigen Schwerpunktachsen, welche auf der Cylinderachse senkrecht stehen. Hieraus erklären sich die Erscheinungen Fig. 86 und 87. Die beiden Cylinder sind mit Fäden an dem Punkte m aufgehängt, der in der Achsenrichtung einer Schwungmaschine liegt. Wird dieselbe rasch gedreht, so wird der Cylinder (Fig. 86) bald die labile Drehachse ab verlassen und sich um die stabile Achse cd zu drehen streben, wobei ihm die Schwere entgegenwirkt. Dagegen wird



die Scheibe (Fig. 87) sich so zu stellen streben, daß sie sich um die Cylinderachse ab dreht. Hier ist also die Cylinderachse stabil, während sie in Fig. 86 labil ist. Zwischen diesen beiden Cylinderformen muß offenbar eine Form liegen, in welcher die geometrische Achse weder labil, noch stabil, sondern indifferent ist, welche Achse also weder mit Kraft in einer Lage verharrt, noch aus einer angenommenen Lage leicht herausweicht, sondern in jeder Lage ruhig bleibt. Dieses findet statt, wenn das Trägheitsmoment in Bezug auf die geometrische Achse ebenso groß ist, als in Bezug auf die zu derselben senkrechten Schwerpunktachsen, d. i., wenn (nach Reuleaux) die Höhe gleich 0,866 von dem Radius ist. Aehnliches ergibt sich für andere Körper. Diese interessanten Erscheinungen lassen sich am besten darstellen mittels einer auf die Schwungmaschine geschraubten Gabel (Fig. 88), deren Arme zur Herstellung der freien Achse verschraubbare Stifte tragen, zwischen deren Spitzen die Körper an kleinen Pfännchen gefaßt werden.

Zweite Abtheilung.

Die Mechanik der flüssigen Körper oder die Hydromechanik.

(Hydrostatik und Hydraulik.)

1. Grundeigenschaften der Flüssigkeiten.

Flüssig ist ein Körper, wenn seine Theilchen zwar noch einen Zusammenhang **152** haben, aber durch die kleinste Kraft gegen einander verschoben werden können. Dies ist (nach 18.) der Fall, wenn die lebendige Kraft der Moleküle so groß ist, daß die schwingende Bewegung derselben in jedem Augenblicke in eine fortschreitende

testen in dieser Beziehung ist Bohnenbergers Maschinchen, weil es die Kegeldrehung der Erdachse nachahmt. An dem innersten Ringe sind zwei kleine Löcher zur Aufnahme eines kleinen Uebergewichtchens, das die ruhende Achse sofort senkrecht stellt, die rotirende aber zur langsamen Kegeldrehung bringt. In ähnlicher Weise würde sich die ruhende Erdachse, welche mit der Ebene der Erdbahn oder Ekliptik einen Winkel von 66½° bildet, auf dieselbe senkrecht stellen. Denn vermöge der Abplattung der Erde hat dieselbe am Aequator einen größeren Radius als gegen die Pole hin, kann also als eine Kugel betrachtet werden, die um den Aequator herum noch einen Wulst trägt, der nach den Polen zu immer dünner wird. Dieser Wulst nun befindet sich nicht in der Ebene der Ekliptik, sondern ist um 23½° gegen dieselbe geneigt, wird aber von der in der Ekliptik stehenden Sonne angezogen. Durch diese Anziehung müßte er sich der Ekliptik nähern, bis er endlich in dieselbe fiele, und so müßte sich die Erdachse auf die Ekliptik senkrecht stellen, sie müßte der Achse der Ekliptik parallel werden, — wenn eben die Erde sich nicht drehen würde. Da dieses aber der Fall ist, so gilt für die Erdachse der zweite Satz, die Erdachse muß sich mit unverändertem Winkel in einer Kegelfläche um die Achse der Ekliptik drehen. Zwar beträgt die Zeit für eine solche Kegeldrehung der Erdachse 26000 Jahre (das sog. Platonische Jahr); es zeigt daher die Erdachse wohl Jahrhunderte lang nach einem Punkte des Himmels, unser Polarstern wird noch lange Zeit als solcher gelten können; allein in Jahrtausenden zeigt sie doch allmälig nach anderen Stellen des Himmels, welche indeß alle gleichweit von dem Ende der Achse der Ekliptik, d. i. von dem Pole der Ekliptik, welcher im Sternbilde des Drachens liegt, entfernt sind. Der Nordpol des Himmels beschreibt also in 26000 Jahren einen Kreis von 23½° Halbmesser um den Pol der Ekliptik, er wird sich z. B. in 12000 J. in dem Sterne Wega (α Lyrae), einem Sterne erster Größe, befinden. Hierdurch verändern sich im Laufe der Zeit manche Erscheinungen. Der große Bär, die Kallisto, die sich zur Zeit der alten Griechen nicht in den reinen Schooß des Okeanos tauchen durfte, geht jetzt theilweise unter; das herrliche Sternbild des südlichen Kreuzes mag wohl den alten Völkern sichtbar gewesen sein, wie Dante uns ahnen läßt, wenn er singt:

> Jo mi volsi a man destra, e posi mente
> All' altro polo, e vidi quattro stelle
> Non viste mai fuorché alla prima gente. (Purgatorio, cant. I, v. 22).

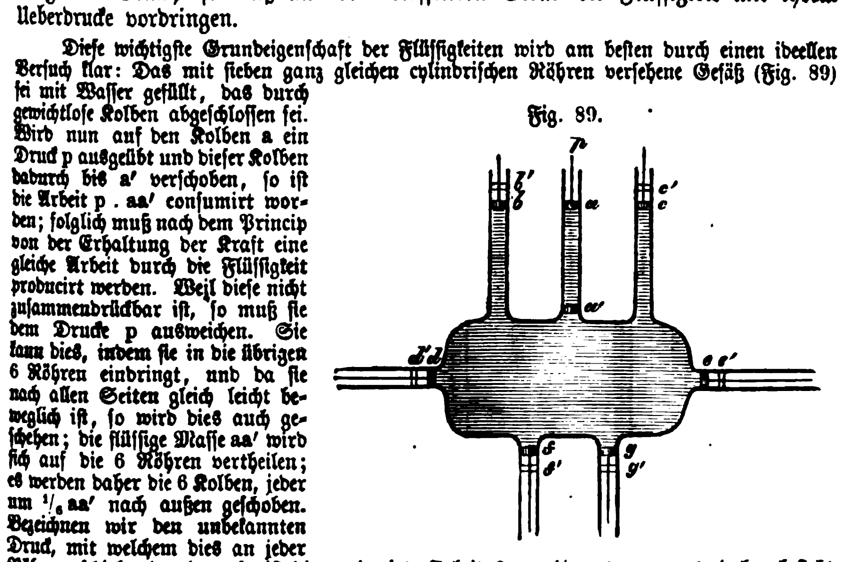
Aus der Veränderung der Polstellung folgt übrigens keine Veränderung der Jahreszeiten; denn die Erdachse verändert ihre Neigung gegen die Ekliptik nicht, und daher behält auch der Aeq. seine N e i g u n g gegen dieselbe, von welcher ja der Wechsel der Jahreszeiten abhängt, vollkommen bei. Allein eine Veränderung der S t e l l u n g des Aeq. gegen die Ekliptik findet wohl statt. So wie die Erdachse sich in 26000 Jahren in umgekehrter Richtung wie die Erde selbst, also von Osten nach Westen, um die Achse der Ekliptik dreht, so muß sich auch der Aeq. in derselben Zeit drehen; folglich müssen die zwei Schnittpunkte von Aeq. und Ekliptik, der Frühlingspunkt und der Herbstpunkt, die zwei Nachtgleichenpunkte, nach Westen rücken; und zwar beträgt die Verrückung oder P r ä c e s s i o n d e r N a c h t g l e i c h e n jährlich 50″, so daß hierdurch die Länge der Sterne, da sie von dem Frühlingspunkte an gerechnet wird, jährlich um 50″ zunimmt, eine Thatsache, die schon von Hipparch (130 v. Chr.) beobachtet wurde. Der Frühlingspunkt, der zu jener Zeit im Widder lag, befindet sich jetzt fast auf der Grenze zwischen dem Wassermann und den Fischen; die Kalenderangaben über die Stellung der Sonne und der Planeten, die noch nach alter Weise erfolgen, sind daher falsch, und die Benennungen der Sternbilder des Thierkreises, die meist mit Jahreserscheinungen zusammenhängen, passen jetzt nicht mehr. Ebenso müssen ältere Sternmessungen, wenn man sie mit heutigen vergleichen will, um den Betrag der seitdem stattgehabten Präcession corrigirt werden, insbesondere die Länge, die Rectascension und die Declination. Auch gelten die Sternkarten immer nur für einige Jahrhunderte. Umgekehrt können alte Angaben über die Stellung der Sterne zur Bestimmung der Zeit dieser Angabe dienen. (Der Thierkreis von Denderah). — Die Präcession ist nicht gleichmäßig, weil die Wirkung der Sonne auf den äquatorialen Erdwulst im Lauf eines Jahres verschieden z. B. im Frühlings- und Herbstpunkte = 0 ist; diese Ungleichmäßigkeit nennt man N u t a t i o n. Auch der Mond bringt Präcession und Nutation hervor; die Lunarnutation ist größer als die Solarnutation, weil die Bahnveränderungen des Mondes stärker sind; deßhalb sagt man wohl, die Nutation rühre von dem Monde her.

151 **Unfreie Achsen, stabile, labile und indifferente Achsen.** Nicht jede Drehachse, wenn sie auch der mechanischen Einrichtung nach in keine Lage gezwungen ist, ist bei der Drehung frei; die analytische Mechanik zeigt, daß eine Drehachse während der Drehung nur dann frei ist, wenn sie durch den Schwerpunkt des Körpers geht, und wenn in Bezug auf dieselbe das Trägheitsmoment entweder ein Maximum oder ein Minimum ist; jede andere Drehachse ist unfrei, mag sie auch die freieste Lagerung oder Aufhängung haben; sie erfährt durch die Centrifugalkräfte einen Druck oder Zug, muß sich also drehen oder fort-

auch sein möge. An der Grenze wird ein Gegendruck von der Grenzwand ausgeübt; ist dieselbe keines Gegendruckes fähig oder ist derselbe kleiner als der ausgeübte Druck, so muß an der betreffenden Stelle die Flüssigkeit mit ihrem Ueberdrucke vordringen.

Diese wichtigste Grundeigenschaft der Flüssigkeiten wird am besten durch einen ideellen Versuch klar: Das mit sieben ganz gleichen cylindrischen Röhren versehene Gefäß (Fig. 89) sei mit Wasser gefüllt, das durch gewichtlose Kolben abgeschlossen sei. Wird nun auf den Kolben a ein Druck p ausgeübt und dieser Kolben dadurch bis a' verschoben, so ist die Arbeit p . aa' consumirt worden; folglich muß nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft eine gleiche Arbeit durch die Flüssigkeit producirt werden. Weil diese nicht zusammendrückbar ist, so muß sie dem Drucke p ausweichen. Sie kann dies, indem sie in die übrigen 6 Röhren eindringt, und da sie nach allen Seiten gleich leicht beweglich ist, so wird dies auch geschehen; die flüssige Masse aa' wird sich auf die 6 Röhren vertheilen; es werden daher die 6 Kolben, jeder um $^1/_6$ aa' nach außen geschoben. Bezeichnen wir den unbekannten Druck, mit welchem dies an jeder Röhre geschieht, durch x, so ist die producirte Arbeit $6 . x . {}^1/_6\,aa' = x . aa'$; daher besteht nach dem Princip die Gl. $x . aa' = p . aa'$, woraus $x = p$; es wird also jeder gleiche Kolben mit dem gleichen Drucke p fortgeschoben. Diese gleiche Fortpflanzung des Druckes nach der Grenze ist aber nur möglich, wenn auch im Inneren derselbe Druck herrscht. Das Gesetz gilt nicht blos für bewegte Flüssigkeit, sondern auch für ruhende; die eben ausgeführte Ableitung wird einfach dadurch auf eine ruhende Flüssigkeit ausgedehnt, daß man die Wege unendlich klein setzt.

Fig. 89.



Durch diesen ideellen Versuch ist das Bestehen des Gesetzes zwar bewiesen, aber nicht erklärt. Dies kann auf folgende Weise geschehen: Durch einen Druck auf eine Flüssigkeit werden die gedrückten Moleküle ein wenig vorangeschoben, d. h. sie erfahren eine Vermehrung ihrer fortschreitenden Bewegung und dadurch eine Verstärkung ihrer lebendigen Kraft. Demnach müssen diese Moleküle auf die folgenden stärker stoßend einwirken und so auch deren lebendige Kraft erhöhen. Weil nun aber die fortschreitende Bewegung der Moleküle jeden Augenblick nach allen Richtungen stattfindet, so muß auch nach allen Seiten die lebendige Kraft der Theilchen erhöht, also der Druck nach allen Seiten fortgepflanzt werden. In einer von festen Grenzwänden umschlossenen Flüssigkeit muß er auch nach rückwärts gleich groß sein; denn in diesem Falle können die Moleküle der Grenzwand keine Arbeit mittheilen, kehren also mit derselben lebendigen Kraft um, so daß in jedem Punkte der Druck von allen Seiten gleich groß wird. Ist aber eine Stelle der Grenzwand beweglich, so empfängt sie Arbeit; die Moleküle kehren daher nicht mit derselben lebendigen Kraft um, der Druck nach rückwärts ist dann im Innern kleiner als der nach vorwärts, die flüssige Masse muß sich voran bewegen nach der beweglichen Grenzwand, nach dem Kolben hin. Daß die Fortpflanzung des Druckes mit der molekularen Bewegung zusammenhängt, dafür spricht ein Versuch von O. E. Meyer (1873), nach welchem die Geschw. der Fortpflanzung des Druckes in Röhren etwa 1000^m beträgt, also mit der des Schalles in Wasserröhren übereinstimmt.

Das Gesetz der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes kommt fast in allen Lehren über die Flüssigkeiten und die Luftarten zur Verwendung. Dasselbe zeigt sich besonders auffallend in folgenden Erscheinungen: Ein mit Wasser gefülltes Glas zerbricht, wenn man in dem Wasser eine Glasthräne zerspringen läßt. — Das Fischprellen besteht darin, daß man mit einem Hammer auf das Eis schlägt, unter welchem im Wasser ein Fisch schwimmt, oder daß man einen stark explosiven Stoff im Wasser entzündet. — Der kartesianische Taucher, eine im Wasser schwimmende hohle Gestalt mit einer Oeffnung an der Seite, sinkt hinab, wenn auf das Wasser ein Druck ausgeübt wird, weil durch diesen Druck das Wasser

übergeht. Je mehr von den Molekülen in fortschreitender Bewegung begriffen sind, desto leichtflüssiger ist der Körper; leichtflüssig sind condensirte Gase, Aether, Alkohol, ätherische und Steinöle, besonders Gasolin und Rhigolin, Schwefelkohlenstoff, Anilin, Wasser; zähflüssig die fetten Oele, Schwefelsäure, Glycerin, Syrup; schwerflüssig sind Quecksilber und andere flüssige Metalle. Aus der Definition der Flüssigkeiten ergeben sich folgende Grundeigenschaften:

a. Die Flüssigkeiten haben selbständiges Volumen; denn ihre Theilchen besitzen Zusammenhang; sie haben aber, wenn sie nicht unabhängig von der Erde und anderen Körpern sind, keine selbständige Gestalt, weil sowohl die Erde als auch andere nahen Körper die leicht beweglichen Theilchen aus ihrer Lage ziehen können.

b. Die Flüssigkeiten nehmen die Formen ihrer Gefäße an, weil jede höhere Schicht durch ihr Gewicht auf die tieferen drückt und daher die Theilchen in jeden, etwa leer gedachten, Raum hineinschieben müßte.

c. Die höchste Oberfläche der Flüssigkeiten ist wagrecht. Wäre sie nicht wagrecht, so könnte man sich unter den obersten Theilchen schiefe Ebenen denken, auf denen dieselben alsdann herabrollen müßten; dies kann so lange geschehen, bis keine schiefe Ebene mehr denkbar, bis also die Oberfläche wagrecht ist, d. h. auf der Richtung nach dem Schwerpunkte der Erde senkrecht steht.

d. Die wagrechte Oberfläche der Flüssigkeiten ist ein Theil einer sehr großen Kugelfläche. Wäre die ganze Erde mit Wasser bedeckt, so müßte jedes Element der Oberfläche auf der Richtung nach dem Schwerpunkte senkrecht stehen; diejenige Fläche aber, deren Elemente sämmtlich auf den Richtungen nach einem Punkte senkrecht stehen, ist die Kugelfläche; das Meer hat also eine Kugeloberfläche; an Seen, in Gefäßen u. s. w. ist wegen der Kleinheit der Oberfläche im Verhältnisse zur Größe der Kugel die Krümmung unmerklich.

e. Unabhängige Flüssigkeiten haben Kugelgestalt. Bestände die Erde ganz aus Wasser, so müßte sie nach d. ebenfalls eine Kugel sein. Diese Folgerung müßte auch für kleinere Körper gelten, wenn sie frei und flüssig im Weltraume schwebten; sie wären Tropfen im Weltraume. Für sehr kleine Mengen von Flüssigkeiten auf der Erde ist die Schwere so gering, daß sie die gegenseitige Anziehung der Theilchen nicht überwinden kann; dieselben sind also auch gleichsam von der Schwere unabhängig und nehmen daher Kugelgestalt an; dies erklärt die Gestalt der Tropfen; doch wirkt hierbei die Oberflächenspannung mit, welche, wie wir später sehen werden, nur bei der Kugelfläche ringsum gleich groß ist. Besonders interessant ist in dieser Beziehung der Plateau'sche Versuch (1843): In eine Mischung von Weingeist und Wasser, welche dasselbe specifische Gewicht wie Oel besitzt, bringt man mit einer Pipette eine geringere oder größere Quantität Oel; das Gewicht derselben wird von der leichtflüssigen und daher nachgebenden Mischung getragen und aufgehoben, weil diese einen gleichen Gegendruck ausübt; die Oelmasse wird dadurch unabhängig von der Schwere und nimmt daher Kugelgestalt an. Man kann mit dieser Kugel die Abplattung der Erde und das Kant-Laplace'sche Weltbildungssystem veranschaulichen, indem man durch die Kugel eine Achse steckt und diese rotiren läßt. Die Kugel rotirt dann ebenfalls, plattet sich ab, nimmt Ringform an und löst sich in kreisende Kugeln auf.

f. Die Flüssigkeiten haben keine Poren im gewöhnlichen Sinne; denn befänden sich größere Lücken in dem Gewebe der Moleküle, so würden die leicht beweglichen Theilchen in diese Lücken hineinfließen und dieselben erfüllen. Molekulare Zwischenräume besitzen die Flüssigkeiten wie alle anderen Körper, sogar durchschnittlich größere als die festen Körper. Da nun die Gasmoleküle und theilweise auch die Moleküle der Flüssigkeiten in fortschreitender Bewegung begriffen sind, so müssen dieselben, wenn sie in Berührung mit einer Flüssigkeit stehen, zwischen die Moleküle derselben eindringen oder diffundiren und so sich in derselben auflösen, wenn die materielle Verschiedenheit dies gestattet.

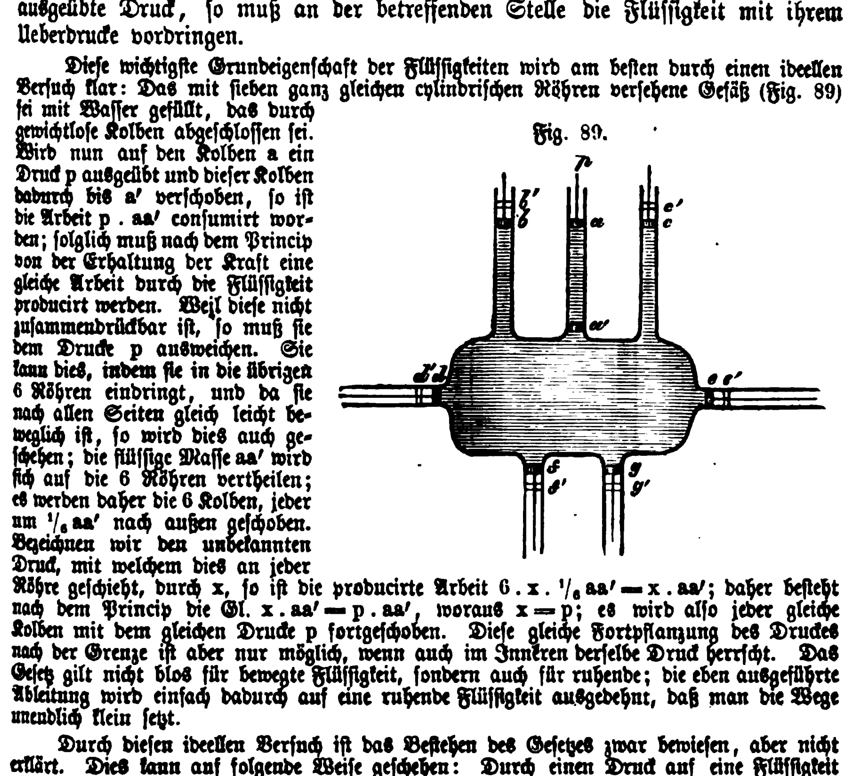
g. Die Flüssigkeiten sind nur wenig compressibel, weil sie nicht wie die festen Körper Poren haben, und weil ihre Moleküle nicht wie bei den Luftarten sehr weit von einander abstehen. Näheres s. 53. Hört eine zusammendrückende Kraft zu wirken auf, so kehren die Moleküle vermöge ihrer Bewegung in die frühere Lage zurück, der Körper dehnt sich also wieder aus: Flüssigkeiten sind ausdauernd elastisch.

153 **Die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes** (Pascal 1650). Wird auf eine Flüssigkeit an irgend einer Stelle ein Druck ausgeübt, so pflanzt sich dieser Druck in unmeßbar kurzer Zeit durch die ganze flüssige Masse bis an die Grenzen der Flüssigkeit und zurück fort, so daß jede gleich große Fläche im Innern wie an der Grenze einen gleich großen Druck erleidet, welches die Richtung der Fläche

auch sein möge. An der Grenze wird ein Gegendruck von der Grenzwand ausgeübt; ist dieselbe keines Gegendruckes fähig oder ist derselbe kleiner als der ausgeübte Druck, so muß an der betreffenden Stelle die Flüssigkeit mit ihrem Ueberdrucke vordringen.

Diese wichtigste Grundeigenschaft der Flüssigkeiten wird am besten durch einen ideellen Versuch klar: Das mit sieben ganz gleichen cylindrischen Röhren versehene Gefäß (Fig. 89) sei mit Wasser gefüllt, das durch gewichtlose Kolben abgeschlossen sei. Wird nun auf den Kolben a ein Druck p ausgeübt und dieser Kolben dadurch bis a' verschoben, so ist die Arbeit p . aa' consumirt worden; folglich muß nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft eine gleiche Arbeit durch die Flüssigkeit producirt werden. Weil diese nicht zusammendrückbar ist, so muß sie dem Drucke p ausweichen. Sie kann dies, indem sie in die übrigen 6 Röhren eindringt, und da sie nach allen Seiten gleich leicht beweglich ist, so wird dies auch geschehen; die flüssige Masse aa' wird sich auf die 6 Röhren vertheilen; es werden daher die 6 Kolben, jeder um $^1/_6$ aa' nach außen geschoben. Bezeichnen wir den unbekannten Druck, mit welchem dies an jeder Röhre geschieht, durch x, so ist die producirte Arbeit 6 . x . $^1/_6$ aa' = x . aa'; daher besteht nach dem Princip die Gl. x . aa' = p . aa', woraus x = p; es wird also jeder gleiche Kolben mit dem gleichen Drucke p fortgeschoben. Diese gleiche Fortpflanzung des Druckes nach der Grenze ist aber nur möglich, wenn auch im Inneren derselbe Druck herrscht. Das Gesetz gilt nicht blos für bewegte Flüssigkeit, sondern auch für ruhende; die eben ausgeführte Ableitung wird einfach dadurch auf eine ruhende Flüssigkeit ausgedehnt, daß man die Wege unendlich klein setzt.

Fig. 89.



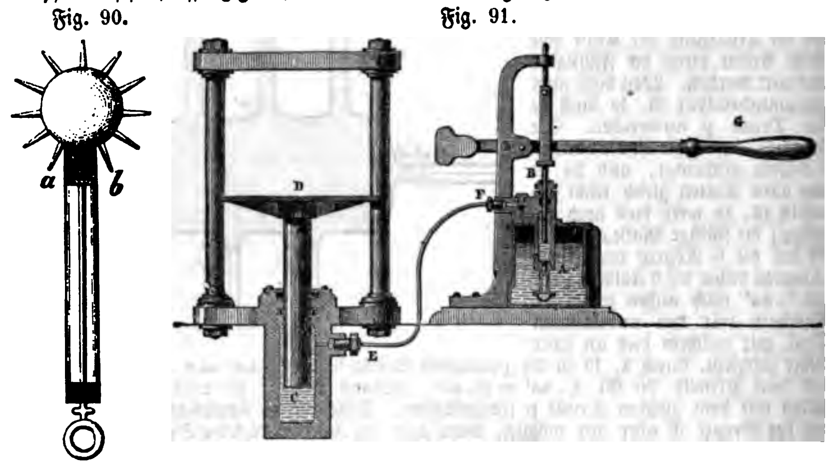
Durch diesen ideellen Versuch ist das Bestehen des Gesetzes zwar bewiesen, aber nicht erklärt. Dies kann auf folgende Weise geschehen: Durch einen Druck auf eine Flüssigkeit werden die gedrückten Moleküle ein wenig vorangeschoben, d. h. sie erfahren eine Vermehrung ihrer fortschreitenden Bewegung und dadurch eine Verstärkung ihrer lebendigen Kraft. Demnach müssen diese Moleküle auf die folgenden stärker stoßend einwirken und so auch deren lebendige Kraft erhöhen. Weil nun aber die fortschreitende Bewegung der Moleküle jeden Augenblick nach allen Richtungen stattfindet, so muß auch nach allen Seiten die lebendige Kraft der Theilchen erhöht, also der Druck nach allen Seiten fortgepflanzt werden. In einer von festen Grenzwänden umschlossenen Flüssigkeit muß er auch nach rückwärts gleich groß sein; denn in diesem Falle können die Moleküle der Grenzwand keine Arbeit mittheilen, kehren also mit derselben lebendigen Kraft um, so daß in jedem Punkte der Druck von allen Seiten gleich groß wird. Ist aber eine Stelle der Grenzwand beweglich, so empfängt sie Arbeit; die Moleküle kehren daher nicht mit derselben lebendigen Kraft um, der Druck nach rückwärts ist dann im Innern kleiner als der nach vorwärts, die flüssige Masse muß sich voran bewegen nach der beweglichen Grenzwand, nach dem Kolben hin. Daß die Fortpflanzung des Druckes mit der molekularen Bewegung zusammenhängt, dafür spricht ein Versuch von O. E. Meyer (1873), nach welchem die Geschw. der Fortpflanzung des Druckes in Röhren etwa 1000^m beträgt, also mit der des Schalles in Wasserröhren übereinstimmt.

Das Gesetz der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes kommt fast in allen Lehren über die Flüssigkeiten und die Luftarten zur Verwendung. Dasselbe zeigt sich besonders auffallend in folgenden Erscheinungen: Ein mit Wasser gefülltes Glas zerbricht, wenn man in dem Wasser eine Glasthräne zerspringen läßt. — Das Fischprellen besteht darin, daß man mit einem Hammer auf das Eis schlägt, unter welchem im Wasser ein Fisch schwimmt, oder daß man einen stark explosiven Stoff im Wasser entzündet. — Der kartesianische Taucher, eine im Wasser schwimmende hohle Gestalt mit einer Oeffnung an der Seite, sinkt hinab, wenn auf das Wasser ein Druck ausgeübt wird, weil durch diesen Druck das Wasser

in die Figur dringt und diese dadurch schwerer macht. — Unter den empfehlenswerthen und billigen Glasapparaten, welche nach Prof. Schäffer in Jena von thüringischen Glasfabriken z. B. in Ilmenau für die Lehre von den Flüssigkeiten und Luftarten angefertigt werden, ist auch der Apparat (Fig. 90), der das Gesetz der gleichförmigen Fortpflanzung durch einen einfachen Versuch ausnehmend deutlich darstellt.

Eine besonders wichtige Anwendung hat die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes in der **hydraulischen Presse** (Stevin 1600, Bramah 1797). Wenn nämlich der mittels eines Kolbens ausgeübte Druck sich auf jede gleich große Fläche in derselben Größe fortpflanzt, so muß eine n mal so große Fläche einen n fachen Druck erfahren; man kann demnach einen auf Wasser ausgeübten Druck beliebig vervielfachen, indem man einfach das Wasser auf eine beliebig große, fortschiebbare Fläche einwirken läßt; nur ist dem bekannten Princip gemäß die Bewegung dieser Fläche viel kleiner als die des Kolbens. Hierauf beruht die hydraulische Presse (Fig. 91). Mittels des einarmigen Hebels G wird der Druckkolben B

Fig. 90. Fig. 91.



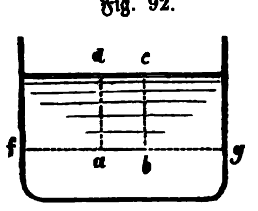
einer kleinen Pumpe auf- und abbewegt und dadurch Wasser in die kleine Pumpe gesogen und durch das Rohr FE in das Reservoir C getrieben. Der hierbei von dem Druckkolben B ausgeübte Druck pflanzt sich auf den Preßkolben in C fort, wird aber dort soviel mal größer, als die Unterfläche dieses Kolbens größer ist als diejenige des Druckkolbens B. Ist z. B. wie bei der großen hydraulischen Presse, die an der großen Röhrenbrücke über den Menai-Kanal nach der Insel Anglesea zum Heben der einzelnen Röhrenstücke benutzt wurde, der Durchmesser des Druckkolbens = 1″ engl. und der des Preßkolbens = 20″, so übt der letztere einen 400mal so großen Druck als der erstere aus; durch den Hebel G kann diese Vergrößerung z. B. 10 bis 20 mal vervielfacht werden. So kann ein Mann, der eine Druckkraft von 50^{kg} besitzt, wohl eine Pressung von $400\,000^{kg}$ ausüben; an jener Brücke wurden Stücke von über 1 Million kg Gewicht gehoben. Auch benützt man die hydraulische Presse zum Auspressen in Oelmühlen, Rübenzuckerfabriken, Stearinfabriken, zum Glätten von Papier und Zeug, zum Zusammenpressen von Baumwolle, Heu u. s. w., zur Prüfung der Festigkeit von Tauen, Ketten, Platten u. s. w., zum Krümmen der Schiffpanzerplatten, zum Einpressen von Luft in große Räume z. B. in den Mont-Cenis-Tunnel, zum Eintreiben der Räder auf ihre Wellen u. s. w.

154 Aufg. 221. Wie groß ist der Druck auf einen Kreis von 45^{cm} Durchmesser, auf ein Rechteck von 20^{cm} Höhe und 12^{cm} Breite, auf eine Ellipse von 15^{cm} großer und 8^{cm} kleiner Achse, auf ein Trapez von 25^{cm} Höhe und parallelen Seiten von 40 und 30^{cm}, wenn der Druck auf $1^{qcm} = 24^{g}$ beträgt? Aufl.: $38{,}17^{kg}$, $5{,}76^{kg}$, $2{,}262^{kg}$, 21^{kg}. — A. 222. In einer Presse ist der Durchmesser des Druckkolbens $1{,}5^{cm}$, der des Preßkolbens 15^{cm}, ein Mann drückt an einem Hebel von 2^{m} Länge, der die Stange in 15^{cm} Entfernung vom Stützpunkte trägt, mit 40^{kg}; wie groß ist der Druck des Preßkolbens? Aufl.: 60681^{kg}. — A. 223. Wie groß mußte an der Menai-Brücke der Nutzeffect der Dampfmaschine sein, wenn die Kolbenstange derselben direct auf den Druckkolben wirkte, und wenn ein Stück von 1 Mill. kg in jeder Stunde 9^{m} gehoben werden sollte? Aufl.: $33\frac{1}{3}$ e. — A. 224. Wenn ein Mann von 30^{kg} Druckkraft mit einem Hebel von 10facher Uebersetzung und einem Druckkolben von 2^{cm} Durchmesser einen Druck von $20\,000^{kg}$ ausüben soll, welchen Durchmesser muß dann der Preßkolben haben? Aufl.: $16{,}3^{cm}$.

2. Das Princip der gleichmäßigen Druckfortpflanzung in Verbindung mit dem Gewichte der Flüssigkeiten.

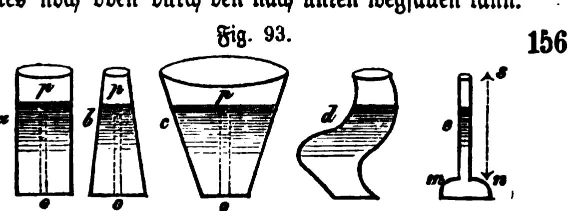
Druck durch das Gewicht der Flüssigkeiten. Auf einem beliebigen, wagrechten Flächenelement ab (Fig. 92) im Inneren einer Flüssigkeit ruht der flüssige Körper abcd; das Flächenelement hat das Gewicht dieser Säule zu tragen, erleidet also denselben Druck, als ob ein Kolben mit einer Kraft, jenem Gewichte gleich, auf dasselbe gesetzt wäre. Da nun ein solcher Druck nach dem Princip sich nach allen Richtungen in gleicher Stärke auf jedes gleiche Flächenelement fortpflanzt, so finden folgende Pressungen statt: 1. Jedes gleiche Flächenelement derselben wagrechten Ebene fg erleidet einen Druck von oben nach unten, der nur von der Größe des Elementes und seiner senkrechten Entfernung vom Spiegel abhängt; die Größe dieses Druckes ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche das Flächenelement und deren Höhe der Abstand desselben vom Spiegel ist. Es ist hierbei einerlei, ob die Wände des Gefäßes senkrecht oder schief nach auswärts, schief nach einwärts, nach oben oder unten eingebogen, oder von jeder beliebigen Form sind; wo das Element die betreffende flüssige Säule nicht über sich hat, rührt der Druck von anderen Elementen derselben wagrechten Ebene her. Jedes Element einer höher gelegenen wagrechten Ebene erleidet einen kleineren Druck, jedes niedriger gelegene Element einen größeren Druck. 2. Dieser Druck auf die Flächenelemente findet nicht blos von oben nach unten, sondern auch in jeder beliebigen Richtung innerhalb der wagrechten Ebene statt; jedes Flüssigkeitstheilchen erleidet von allen Seiten genau denselben Druck und ist daher im Gleichgewichte; auch die Wände erfahren denselben und erwiedern ihn, wenn ihre Festigkeit es gestattet. 3. Derselbe Druck pflanzt sich auch auf den Boden und von diesem zurück aufwärts fort; es findet also auf das Flächenelement ab genau derselbe Druck von unten nach oben, wie von oben nach unten statt, wodurch diese Druckkräfte einander aufheben und daher die Ruhe von ab nicht stören. Deßhalb aber kann der abwärts gerichtete Druck nicht auch auf tiefere Elemente wirken, diese erfahren von oben und von unten den größeren Druck, der ihrer Flüssigkeitsäule entspricht; er kann sich auch nicht auf höhere Elemente übertragen, diese erleiden nur den Druck von unten, der von den Säulchen auf ihrer wagrechten Ebene herrührt. Dieser Druck von unten nach oben findet auch statt, wenn über dem Element ab die Flüssigkeit weggenommen wäre; er rührt alsdann von den seitlichen Elementen derselben wagrechten Ebene her. Er findet auch statt, wenn an die Stelle der Flüssigkeit abcd ein anderer Körper gesetzt würde; ja er ist erst dann recht merklich, weil dann der Druck von oben nach unten ein anderer sein kann, und hierdurch die Aufhebung des Druckes noch oben durch den nach unten wegfallen kann. 155

Fig. 92.



Der Bodendruck (Stevin 1600). Das hydrostatische Paradoxon. Unter dem Bodendrucke versteht man den Druck, den der Boden eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes durch dieselbe erfährt. Ueber die Größe desselben besteht folgendes Gesetz: Der Bodendruck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche der Boden und deren Höhe 156

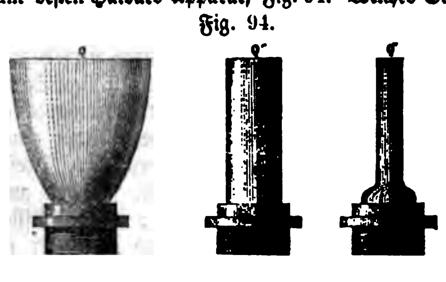
Fig. 93.

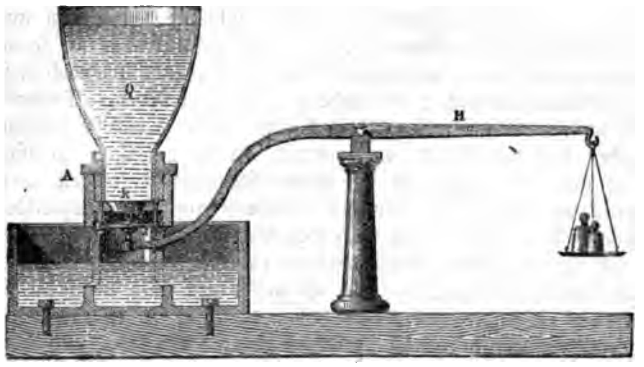


der **Abstand des Bodens vom Spiegel** ist. Denn es erfährt irgend ein Flächenelement o (Fig. 93) der tiefsten Schicht, das noch senkrecht unter dem Spiegel ist, den Druck des über ihm stehenden Säulchens op; dieser Druck aber pflanzt sich nach 155. in gleicher Größe auf jedes gleiche Flächenelement der tiefsten Schicht fort; es hat also jedes gleiche Flächenelement den Druck eines solchen Säulchens zu tragen, mag dieses über dem Element wirklich vorhanden sein oder nicht, wie es z. B. in b, d und e der Fall ist. Der Druck auf die unterste Schicht geht nun direct auf den Boden über; daher hat der Boden den Druck aller dieser Säulchen auszuhalten, d. i. das Gewicht einer Säule, deren Grundfläche der Boden und deren Höhe dessen Abstand vom Spiegel ist.

Der Bodendruck ist also unabhängig von der Form des Gefäßes und von der Flüssigkeitsmenge; alle Gefäße von gleichem Boden und gleich hohem Spiegel haben denselben Bodendruck, obwohl vielleicht in dem Gefäße c zwanzig mal soviel Flüssigkeit enthalten ist als in e. Dies erscheint dem gewöhnlichen Sinne unglaublich; daher heißt das angeführte Gesetz das hydrostatische Paradoxon. Besonders unglaublich erscheint es, daß der Boden, wie in b und e einen viel größeren Druck erleiden soll, als das Gewicht der Flüssigkeit beträgt. Daher ist hier der experimentelle Nachweis besonders wichtig. Man benutzt dazu am besten Haldats Apparat, Fig. 94. Welches Gefäß auch bei A aufgeschraubt werde, immer ist dasselbe Gewicht nöthig, um das Ventil k, das den Bodendruck zu tragen hat, zu heben und dadurch das Wasser zum Abfließen zu bringen. Wenn nun nach solchen Versuchen die Wahrheit des obigen Gesetzes nicht mehr bezweifelt werden kann, so erscheint es doch unerklärlich, daß der Bodendruck nicht in allen Fällen mit seiner gesetzmäßigen Größe wirkt. Setzt man sich z. B. das Gefäß e (Fig. 93) auf den Kopf oder auf die Wage, so verspüren beide nur die Wirkung des Gewichtes, nicht aber des Bodendruckes. Dies erklärt sich daraus, daß bei m und n ein Druck nach oben herrscht, der einer Flüssigkeitssäule von der Höhe ns entspricht, aber nicht durch eine wirklich vorhandene, nach unten drückende Säule ns aufgehoben wird. Dieser Druck nach oben pflanzt sich durch die Wände auf den Boden fort, so daß die Unterfläche des Bodens nur mit dem wirklich vorhandenen Gewichte nach unten drückt, während die Oberfläche den gesetzmäßigen Druck tragen muß. Aehnlich erklärt sich auch, daß in c auf die Wage ein größerer Druck als der Bodendruck wirkt.

Fig. 94.





Der Bodendruck wird angewandt: zur Ausziehung von Extractivstoffen aus Pflanzen durch Reals **Extractivpresse**, ein weites, die Pflanzen enthaltendes Gefäß, das oben eine hohe, enge, mit Wasser gefüllte Röhre trägt und daher einen Druck erfährt, als ob das Gefäß mit seiner ganzen Weite bis auf dieselbe Höhe ginge und mit Wasser gefüllt wäre; sodann im **anatomischen Heber**, eine hohe, unten umgebogene, in ein weites Gefäß mündende Röhre, durch deren Wasserdruck eine über das Gefäß gespannte Haut so ausgedehnt wird, daß man die anatomische Beschaffenheit derselben erkennen kann. Auf dem Boden tiefer Meere ist der Druck so groß, daß leere und hermetisch geschlossene Gefäße dort zerdrückt oder angefüllt werden, daß versunkene Fahrzeuge verderben, weil das Holz durch den Druck zu dicht und schwer geworden ist, daß Thiere aus höheren Meeresschichten

nde gehen, wenn sie rasch in große Tiefen gelangen, wie Versuche mit der hydrau- Presse bewiesen.

er Druck, den eine Wassersäule ausübt, wird auch zum Betriebe einer Kraftmaschine, nannten **Wassersäulenmaschine** benutzt, welche von Reichenbach erfunden wurde besondere zur Beförderung großer Wassermassen angewandt So heben die Wassersäulenmaschinen von Reichenhall die über 300′ hoch und befördern sie 30 Stunden weit fort zu depfannen. Von der Wirkung dieser Maschine kann uns , welche eine doppelt wirkende Wassersäulenmaschine mit euerung zum Pumpenbetriebe vorstellt, eine Idee geben. ule des Treibwassers kommt durch die Röhre ab in die ammer c, in welcher die Steuerkolben so stehen, daß das sser in den Treibcylinder d unter den Treibkolben f gelangt ch seinen Druck diesen Kolben und damit die Kolbenstange , wodurch auch der Pumpenkolben i gehoben wird. Das Treibwasser über dem Kolben f kann durch das Abfallrohr k . Ist der Treibkolben oben angelangt, so hat in demselben ücke ein Arm g an der Kolbenstange die Steuerkolben so , daß das Treibwasser jetzt über den Treibkolben gelangt, dieser sinkt, während das vorige Treibwasser durch das hr l fortfließt. So erzeugt das Wasser der Säule ab - und hergehende Bewegung der Stange gh und hier- s Pumpenkolbens i, wodurch das Wasser n in das Rohr en wird.

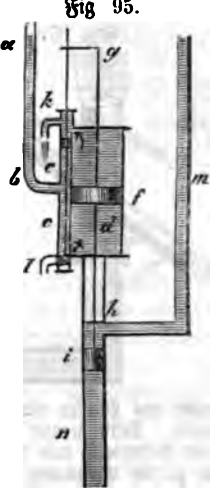


Fig 95.

as Gesetz über den Bodendruck gilt auch für jede Stelle b der Flüssigkeit; nur ist die Grundfläche der Säule hier ückte Stelle.

ufg. 225. Wie groß ist der Bodendruck in dem mit Wasser Gefäße c, Fig. 93, wenn die Grundfläche 6cm Durchmesser hat und die Höhe 20cm be- 157 Aufl.: 565,5g. — A. 226. Eine Reals Presse habe ein cubisches Gefäß von 30cm Kante e Röhre von 30m Höhe; wie groß ist der Bodendruck? Aufl.: 2700kg. — A. 227. ß ist in einem Quecksilbergefäße der Druck auf ein gleichseitiges Dreieck von 8cm welches 10cm unter dem Spiegel liegt? Aufl.: $\frac{1}{4} \cdot 8^2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 13{,}6 = 3769$g. — Welchen Druck hat ein Mann von 120qdm Oberfläche in einer Taucherglocke oder Staphander zu ertragen, wenn er 30m tief eingetaucht ist? Aufl.: 36000kg. — In einem anatomischen Heber soll der Druck auf 1qcm 1kg betragen; wie hoch Röhre über der Haut mit Wasser gefüllt sein? Aufl.: 10m.

er Seitendruck (Stevin 1600). Der Seitendruck ist der Druck, den eine 158 keit durch ihr Gewicht auf die Seitenwände des Gefäßes ausübt. Am len beobachtet man denselben an dem Ausflußgefäße (Fig. 96); e kein Seitendruck, so müßte das Wasser wie in einem über- en Gefäße an der Wand herabrinnen; das Herausschießen ssers zeigt, daß es einem Seitendrucke unterworfen ist, und stigere Herausschießen der unteren Strahlen zeigt, daß er Tiefe wächst. Für denselben gilt folgendes Gesetz: Der ndruck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeit- , deren Grundfläche die gedrückte Stelle und Höhe die Entfernung des Schwerpunktes der- vom Spiegel ist.

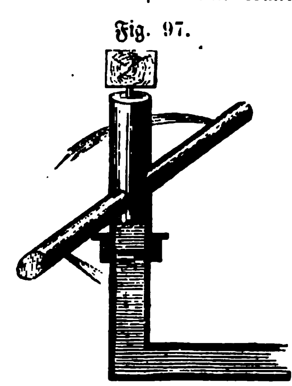
Fig. 96.

Beweis. Wir denken uns die gebrückte Fläche durch wagrechte Linien blich schmale Streifen s, s′, s″ u. s. w. zerlegt, deren Abstände von piegel = a, a′, a″ u. s. w. seien. Dann sind nach 155. die Pres- uf diese Streifen = ias, ia′s′, ia″s″ u. s. w., wo i das Gewicht itseinheit der Flüssigkeit ist. Der Druck auf die ganze Fläche f ist demnach = i (as + a″s″ + ...). Dieser Klammerausdruck ist aber die Summe der statischen Mo- er einzelnen Flächentheile in Bezug auf den Spiegel, welche Summe nach dem Be- gsatze des Schwerpunktes (f. 118.) gleich dem Moment der ganzen Fläche, d. i. gleich oducte der ganzen Fläche f mit dem Abstande h des Schwerpunktes von dem Spiegel . Folglich ist i (as + a′s′ + a″s″ + ...) = ifh (q. e. d.)

Will man den Seitendruck als Kraft in Rechnung ziehen, so müßte man den An- nkt dieser Kraft, den Mittelpunkt des Druckes kennen. Dieser fällt nicht mit dem

Schwerpunkt zusammen, weil die parallelen Druckkräfte auf die verschieden tiefen Theile der gedrückten Fläche nicht einander gleich sind, sondern er liegt tiefer als der Schwerpunkt; er muß durch eigene Rechnung bestimmt werden. Bei der Anlage von Schleußen und Dämmen muß man den Seitendruck berücksichtigen. In einem gefüllten Gefäße wird der Seitendruck auf die eine Wand durch den gleichen Druck auf die andere Wand aufgehoben.

Fig. 97.



Erhält aber die eine Wand eine Oeffnung, so wird die gedrückte Fläche, folglich auch der Seitendruck auf dieselbe kleiner; daher wird der Druck auf die entgegengesetzte Wand jetzt nicht mehr vollständig aufgehoben, und der Ueberschuß kann bewegend wirken. Wird demnach ein Gefäß an einer Schnur aufgehängt, so neigt es sich nach der dem Ausfluße entgegengesetzten Seite. Wird ein Gefäß drehbar aufgestellt und trägt es Arme, welche seitliche Ausflußöffnungen haben, so muß es sich ebenfalls nach entgegengesetzter Richtung drehen. Man nennt diese Wirkung die Reaction des ausfließenden Wassers; auf derselben beruht das *Segner'sche Wasserrad*, welches directe Anwendung gefunden hat zu dem Reactionsrad von Althans in Vallendar (Fig. 97), dessen Einrichtung durch die Figur deutlich ist. In dieser Kraftmaschine geht ein großer Theil der in dem Wasser vorhandenen lebendigen Kraft verloren, weil das Wasser mit großer Geschwindigkeit aus derselben fließt. Whitelaw brachte daher Sförmig gekrümmte Ausflußröhren an, durch welche das Wasser allmälig ausfließt und deßhalb seine Geschwindigkeit mehr an dieselben abgibt. Man nennt diese Kraftmaschine die *schottische* oder *Reactionsturbine*. Das Bestreben, das Princip des Segner'schen Wasserrades zu Kraftmaschinen zu benutzen, hat zu der Erfindung der horizontalen Wasserräder oder Turbinen geführt; doch beruhen dieselben nicht auf der Reaction, sondern auf der lebendigen Kraft herunter fließenden Wassers, gehören daher nicht hierher.

159 **Aufg.** 230. Wie groß ist der Seitendruck auf eine rechteckige, 20^{cm} breite Wand, an welcher Wasser 50^{cm} hoch steht? Aufl.: 25^{kg}. — A. 231. Wie groß ist der Seitendruck von Quecksilber auf ein gleichseitiges Dreieck von 10^{cm} Seite, wenn die obere Seite dem Spiegel parallel und 6^{cm} von demselben entfernt ist? Aufl.: $\frac{1}{4} \cdot 10^2 \cdot \sqrt{3} \cdot (\frac{1}{6} \cdot 10\sqrt{3} + 6) 13,6 = 5,233^{kg}$. — A. 232. Wie groß ist der gesammte Seitendruck auf ein cylindrisches Gefäß von 12^{cm} Durchmesser, das bis zu 15^{cm} Höhe mit Wasser gefüllt ist? Aufl.: 4241,6g. — A. 233. Ein Faß, aus Dauben von 1^m Höhe und 30^{cm} Breite bestehend, trägt oben ein 10^m hohes Rohr, und ist, sammt diesem, mit Wasser gefüllt; es platzt durch den Seitendruck auf die Dauben; welchen Druck erfuhr eine solche? Aufl.: 2100^{kg}. — A. 234. An einem 6^m langen Schleußenthore steht das Wasser einerseits $2,4^m$, andererseits 1^m hoch; wie dick muß dasselbe bei 10facher Sicherheit sein, wenn die abs. Festigkeit des Holzes (nach Tab. 75) = 9 ist? Aufl.: Ueberdruck von der höheren Seite = 14280^{kg}, daher nach 71. die Gleichung $14280 \cdot 10 = \frac{4}{3} \cdot fbh^2 / l = \frac{4}{3} \cdot 9 \cdot 2400 \cdot h^2 / 6000$, woraus $h = 172^{mm}$.

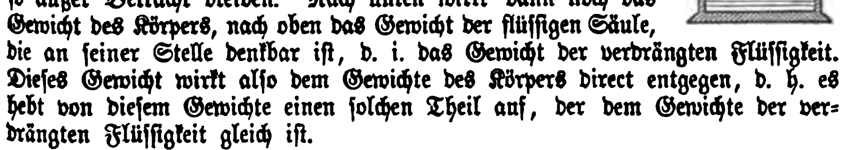
160 **Communicirende Röhren.** Unter communicirenden Röhren versteht man solche aufrechte Gefäße, welche unten mit einander in Verbindung stehen. Für dieselben gilt folgendes Gesetz: *In communicirenden Röhren steht eine und dieselbe Flüssigkeit gleich hoch; die Höhen verschiedener Flüssigkeiten verhalten sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte derselben.* Der erste Theil ergibt sich einfach aus der Lehre vom Seitendrucke; an einer beliebigen Stelle des Verbindungsrohres kann nur dann Gleichgewicht stattfinden, wenn der Seitendruck von beiden Seiten her gleich groß ist; da nun die Stelle nach beiden Seiten gleich groß und die Flüssigkeit beiderseits gleich schwer ist, so kann diese Gleichheit des Seitendruckes nur stattfinden, wenn der Abstand vom Spiegel beiderseits derselbe ist. — Für verschiedene Flüssigkeiten wird der Druck von der einen Seite her in dem Maße größer, als die Flüssigkeit schwerer ist wie die der anderen Seite; damit der Druck ebenso groß werde wie von der anderen Seite, muß folglich die Flüssigkeitssäule in demselben Maße niedriger werden.

Das Gesetz der communicirenden Röhren hat Anwendung zu den Standmessern oder *Wasserstandszeigern*, d. i. Glasröhren, welche mit einem gefüllten Gefäße wie Dampfkesseln u. drgl. in Verbindung stehen und dadurch die Höhe der Flüssigkeit anzeigen; sodann zu der Kanal- oder *Wasserwage*, die aus zwei verbundenen mit Wasser gefüllten Glas-

röhren besteht, und welche dazu dient, den Höhenunterschied verschiedener Punkte eines Terrains zu bestimmen; (zu genaueren Untersuchungen benutzt man die Nivellirwage, bestehend aus Fernrohr und Libelle); endlich zu den Wasserleitungen in Röhren oder geschlossenen Kanälen, mittels deren man Wasser von einer Stelle zu jeder beliebigen anderen, nicht höher gelegenen Stelle führen kann. Jenes Gesetz erklärt uns auch das Steigen und Fallen des Horizontal- oder Grundwassers, des Wassers in Teichen, Sümpfen, Lachen u. s. w., die sich in der Nähe von Flüssen befinden, die Entstehung der Quellen und der artesischen Brunnen. (Näheres in d. Physik d. Erde.)

Der Druck von unten nach oben oder der Auftrieb (Archimedes bei Hiero 220 v. Chr.). Der Druck von unten nach oben ist an jeder Stelle gerade so groß wie der Druck von oben nach unten, also ebenfalls gleich einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche die gedrückte Stelle und deren Höhe der Abstand derselben vom Spiegel ist. Derselbe rührt ebensowohl von der Flüssigkeit oberhalb dieser Stelle her, als von der Flüssigkeit über der ganzen durch jene Stelle gedachten wagrechten Ebene. Er ist also auch vorhanden, wenn über der gedrückten Stelle die Flüssigkeit weggenommen und durch einen anderen festen, flüssigen oder luftförmigen Körper ersetzt wird. Gerade dann ist der Druck von unten nach oben oder der Auftrieb am besten merkbar, und kann man ihn demgemäß experimentell nachweisen. Hat man eine weite Glasröhre, gegen deren untere Oeffnung man mittels einer Schnur eine Platte anziehen kann, so daß dieselbe einen Boden bildet, so fällt dieser Boden ab, wenn man die Schnur losläßt; senkt man die Röhre aber (Fig. 98) mit dem festgezogenen Boden in Wasser, so kann man die Schnur loslassen, ohne daß der Boden abfällt, weil er durch den Druck von unten nach oben an die Röhrenmündung gepreßt wird. Gießt man nun Wasser in die Röhre, so fällt der Boden ab, sowie das Wasser bis zur Höhe des äußeren Spiegels gestiegen ist; hiermit ist nicht nur das Bestehen, sondern auch die Größe des Auftriebes nachgewiesen. 161

Fig. 98.



Aus der Größe des Auftriebes folgt ein wichtiges Gesetz, das Archimedische Princip: *Jeder Körper verliert in Flüssigkeit so viel von seinem Gewichte, als die verdrängte Flüssigkeit wiegt.* Bringen wir einen Körper in Flüssigkeit, so wirkt an seiner Unterfläche als Abtrieb das Gewicht des Körpers und das der Flüssigkeit über demselben; als Auftrieb aber wirkt auf dieselbe das Gewicht der über dieser Unterfläche denkbaren flüssigen Säule. Demnach wirkt die Flüssigkeit oberhalb des Körpers nach unten und nach oben und kann so außer Betracht bleiben. Nach unten wirkt dann noch das Gewicht des Körpers, nach oben das Gewicht der flüssigen Säule, die an seiner Stelle denkbar ist, d. i. das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Dieses Gewicht wirkt also dem Gewichte des Körpers direct entgegen, d. h. es hebt von diesem Gewichte einen solchen Theil auf, der dem Gewichte der verdrängten Flüssigkeit gleich ist.

Dieses wichtige Gesetz kann man einfach nachweisen mittels der *hydrostatischen Wage*, d. i. einer gewöhnlichen Wage, deren eine Schale sehr kurz aufgehängt ist und unten einen Haken trägt. An diesen Haken hängt man ein cylindrisches oder vierkantiges Blechgefäß, das inwendig einen ganz genau anschließenden Metallkörper trägt. Wird die Wage balancirt, sodann der Metallkörper aus dem Gefäße genommen, an einen Haken unter dem Boden des Gefäßes gehängt und in Wasser gesenkt, so ist das Gleichgewicht gestört, die andere Wagschale sinkt; sie hebt sich aber wieder auf die frühere Höhe, wenn man das Gefäß voll Wasser gießt; folglich hatte der Körper durch das Einsenken das Gewicht der gleich großen Wassermenge verloren. — Man kann vermöge des Auftriebes im Wasser Körper heben, die man in der Luft kaum zu lüpfen vermöchte. Der Auftrieb und das Archimedische Princip erklären insbesondere das Verhalten der Körper in Flüssigkeiten,

das Schwimmen, und finden eine wichtige Anwendung zur Bestimmung des specifischen Gewichtes der Körper.

162 **Das Verhalten untergetauchter Körper; das Schwimmen.** Wenn ein untergetauchter Körper specifisch schwerer ist als die Flüssigkeit, so sinkt er; ist er specifisch ebenso schwer als die Flüssigkeit, so schwebt er; ist er specifisch leichter, so steigt er in der Flüssigkeit auf.

Denn im ersten Falle ist der Abtrieb, das Gewicht des Körpers, größer als der Auftrieb, das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit; im zweiten Falle sind Abtrieb und Auftrieb einander gleich, heben sich also auf (der Plateau'sche Versuch); im dritten Falle ist der Auftrieb größer als der Abtrieb. Die Differenz des Auftriebs und Abtriebs bildet die Steigkraft; ein Körper steigt um so rascher, je größer seine Steigkraft ist. So steigt ein unter Wasser gedrückter Kork beim Loslassen rasch auf, unter Wasser ausgegossenes Oel, unter Quecksilber ausgegossenes Wasser steigen in kugeligen Tropfen in die Höhe, und verschiedene, nicht chemisch auf einander wirkende und nicht in einander diffundirende Flüssigkeiten lagern sich nach ihrem specifischen Gewichte über einander. Auch das Diffundiren geschieht nur allmälig gegen die Schwere, Weingeist bleibt lange auf Wasser stehen, das oberste Meerwasser ist noch weit außerhalb der Flußmündung süß. Eisen steigt in Quecksilber auf und schwimmt auf demselben wie Kork in Wasser; der Auftrieb von Grundeis kann so groß werden, daß dasselbe Steine und Pflanzen vom Boden reißt. Luft, welche unter Wasser frei wird, erhebt sich in kugeligen Blasen und steigt in einem fast ganz mit Flüssigkeit erfüllten Gefäße an die höchste Stelle. Darauf beruht die Libelle, welche zum Horizontalstellen aller physikalischen und geometrischen Instrumente, zum Nivelliren u. s. w. benutzt wird; dieselbe besteht aus einer, mit Ausnahme der oberen Mittelfläche in Messing gefaßten gläsernen Röhre oder Dose, die mit Alkohol oder Aether beinahe ganz erfüllt ist; die mittelste Stelle der oberen Mittelfläche ist durch Linien markirt. Ist nun irgend eine Randstelle höher als die Mittelstelle, so geht die Luftblase an die Randstelle; steht aber die Libelle genau horizontal, so befindet sich die Blase an der markirten Mittelstelle. Auch das Heben versunkener Gegenstände durch Kautschukschläuche beruht auf dem Emporsteigen von Luft in Wasser.

Ein untergetauchter specifisch leichterer Körper steigt in Flüssigkeit so weit in die Höhe, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit seinem eigenen Gewichte gleich ist; denn alsdann ist der Auftrieb nur noch so groß als der Abtrieb. Er schwimmt dann natürlich, jedoch nicht auf der Oberfläche, sondern eingetaucht, und zwar um somehr, je größer sein specifisches Gewicht und je kleiner das der Flüssigkeit ist.

Denn je schwerer der Körper und je leichter die Flüssigkeit ist, desto tiefer muß der Körper eintauchen, um das Quantum von Flüssigkeit zu verdrängen, das seinem eigenen Gewichte gleich ist. So sind Ahorn- und Buchenholz specifisch fast ebenso schwer als Wasser, tauchen daher sehr tief ein, während der sehr leichte Kork auf der Oberfläche des schweren Quecksilbers zu schwimmen scheint; ein wirkliches Schwimmen auf der Oberfläche gibt es nicht, weil in diesem Falle keine Spur von Flüssigkeit verdrängt, also auch kein Auftrieb vorhanden wäre.

Ein schwebender oder ein schwimmender Körper schweben oder schwimmen stabil, wenn ihr Schwerpunkt tiefer liegt als der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit; jedoch schwimmt ein schwimmender Körper auch noch stabil, wenn sein Schwerpunkt tiefer liegt als das Metacentrum.

Denn die den Körper tragende Kraft ist das als Auftrieb wirkende Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, das seinen Angriffspunkt in dem Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit hat; dieser Schwerpunkt ist so zu sagen der Aufhängepunkt des schwebenden Körpers; liegt nun der Schwerpunkt desselben tiefer als dieser Aufhängepunkt, so findet bekanntlich Stabilität statt. Ein schwimmender Körper kann indeß auch dann stabil schwimmen, wenn sein Schwerpunkt über demjenigen des verdrängten Wassers liegt; indessen muß der erste Schwerpunkt dann wenigstens tiefer liegen als das Metacentrum, d. i. als derjenige Punkt, in welchem eine durch den Schwerpunkt des verdrängten Wassers gezogene Lothrechte die Mittelachse oder Schwimmachse des Körpers schneidet. Denn auf den schwimmenden und aus seiner lothrechten Lage gebrachten Körper (Fig. 99) wirken zwei Kräfte ein, sein eigenes Gewicht G in seinem Schwerpunkte s abwärts und der Auftrieb G' in dem Schwerpunkte s' des verdrängten Wassers nach $s'm$ senkrecht aufwärts. So lange nun das Metacentrum m über s liegt, streben diese beiden Kräfte den Körper in die frühere Lage zurück zu drehen. Dies ist um so länger möglich, und um so größer ist daher die Stabilität, je tiefer der Schwerpunkt des Körpers liegt, je größer das Gewicht des Körpers ist, und je

weiter er aus seiner Lage gebracht werden kann, ohne daß m unter s rückt, was vorwiegend von der Gestalt des Körpers abhängt. Diese Verhältnisse sind besonders wichtig bei dem Bau und der Belastung der Schiffe. — Fällt das Metacentrum in den Schwerpunkt s, so heben die beiden Kräfte einander auf, der Körper schwimmt indifferent; fällt das Metacentrum unter den Schwerpunkt, so drehen die beiden Kräfte den Körper in der eingeschlagenen Richtung weiter, er schwimmt labil.

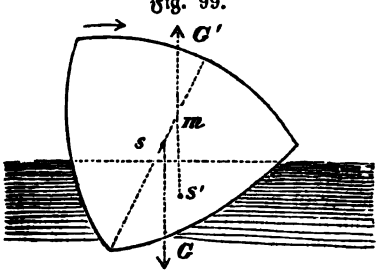


Fig. 99.

Indifferent schwimmt z. B. eine gleichartige Kugel, labil schwimmen aufrechte Stäbe, Balken, Bretter, geschlossene Röhren, sie drehen sich sogleich in die stabile Längenlage. In aufrechter Stellung können sie indessen auch stabil schwimmen, wenn man durch starkes Beschweren des unteren Endes den Schwerpunkt sehr tief legt. Hierauf beruhen die Schwimmstäbe zum Messen der Flußgeschwindigkeit und die Schwimmwagen oder Aräometer zum Bestimmen der Dichte. (Der cartesianische Taucher). Die Fische schwimmen stabil, weil durch die im Rücken liegende Schwimmblase der obere Körpertheil leichter gemacht ist; diese Blase dient den Fischen auch zum Auf- und Absteigen; denn durch Vergrößern derselben vergrößern sie auch ihren Körper und hiermit das Volumen des verdrängten Wassers, also den Auftrieb. — Damit die Schiffe stabil schwimmen, verlegt man mittels des Ballastes den Schwerpunkt möglichst in die Tiefe; ein unbelastetes Schiff muß soviel Ballast einnehmen, daß bei der möglich größten Schwankung das Metacentrum noch über dem Schwerpunkte des Schiffes liegt; im anderen Falle würde das Schiff kentern, d. i. umschlagen. — Die Schiffe können auch von Metall, von Eisen oder Kupfer sein, ohne unterzusinken; denn durch ihren großen Hohlraum kann doch leicht das Gewicht des verdrängten Wassers so groß werden, daß es das Gewicht des Schiffes übertrifft. Man hat hier das Metall gewissermaßen mit Luft verbunden; also kann man auch andere schwerere Körper durch Verbinden mit sehr leichten zum Schwimmen befähigen; darauf beruhen die Transporte riesiger norwegischer Granitblöcke durch Eisberge der Urzeit in die norddeutsche Ebene, sowie die Schwimmgürtel und Schwimmringe, mittels derer des künstlichen Schwimmens Unkundige sich über Wasser halten und Kundige große Strecken durchschwimmen können. Die Menschen sind meist etwas specifisch schwerer als Wasser; das Schwimmen derselben ist daher nicht natürlich, sondern künstlich, ein stetes Wehren mittels des Widerstandes des Mediums gegen das Untersinken, was um so leichter gelingt, je tiefer man eintaucht, und am leichtesten auf dem Rücken, weil dann auch der Kopf eintaucht, und wenn man den Athem anhält, weil sich dann das eingetauchte Volumen vergrößert; nur sehr fette Personen schwimmen natürlich, wie der Neapolitaner Paolo Muccia (1767), der 300 Pfund wog und 30 Pfund weniger als ein gleiches Wasservolumen. Der Bau der Thiere macht sie geschickter zum Schwimmen, als es der Mensch ist; auch sind sie meist etwas leichter wie Wasser. — Schwimmende Gegenstände steigen und fallen mit der Flüssigkeit; darauf beruht die Anwendung von Schwimmern an Dampfkesseln zu Wasserstandszeigern und zu selbstthätigen Speisevorrichtungen, an Gasuhren zum Abschließen des Zuflusses von Gas und zur Constanthaltung des Niveaus u. s. w.

163

Aufg. 235. Wie groß ist der Gewichtverlust eines rechteckigen Körpers von 50^{cm} Länge, 6^{cm} Höhe und 8^{cm} Breite, der ganz in Wasser taucht? Aufl.: 960g. — A. 236. Wie groß ist der Gewichtverlust einer ganz in Quecksilber getauchten Platinkugel von 4^{cm} Durchmesser; sp. G. von Quecksilber 13,6? Aufl.: 455,7g. — A. 237. Wie groß ist der Auftrieb eines Holzcylinders von 20^{cm} Höhe und 10^{cm} Durch. in Weingeist, dessen spec. Gewicht = 0,8? Aufl.: 1256,6g. — A. 238. Wie groß ist die Steigkraft dieses Cylinders in Wasser, wenn das spec. Gew. des Holzes = 0,6 ist? Aufl.: 628,32g. — A. 239. Wie groß ist die Steigkraft einer Korkkugel, Durchm. = 8^{cm}, spec. Gew. = 0,24, in Wasser? Aufl.: 203,7g. — A. 240. Die Steigkraft einer Eisenkugel (Durchm. = 10^{cm}, sp. Gew. = 7,5) in Quecksilber zu finden. Aufl.: 3194g. — A. 241. Wie groß ist der Auftrieb einer Platinkugel (sp. Gew. = 22) von $^1/_2$^{kg} in Wasser? Antw.: Der Auftrieb, d. i. das Gewicht des verdrängten Wassers ist 22 mal kleiner als das abs. Gew., also = 22,7g. — A. 242. Wie groß ist der Gewichtverlust eines Eisenkörpers von 10^{kg} (spec. G. = 7,5) in Wasser? Aufl.: 1,33^{kg}. — A. 243. Was wiegt im Wasser ein Sandstein von 100^{kg} (spec. G. = 2,5)? Aufl.: 60^{kg}. — A. 244. Was wiegt in Quecksilber eine Platinkugel von 300g? Aufl.: 114,5g. — A. 245. Was wiegt in Weingeist eine Holzkugel von 100g; sp. G. = 0,9? Aufl.: 11$^1/_9$g. — A. 246. Der Gewichtverlust eines Körpers in Wasser beträgt 23g, welches ist sein Volumen? Aufl.: 23^{ccm}. — A. 247. Eine Kugel verliert in

Wasser 4188,8g; wie groß ist ihr Halbmesser? Aufl.: 10cm. — A. 248. Wie viel kg kann Jemand in der Luft heben, der in Wasser einen 150kg schweren Stein (spec. G. = 2,5) heben kann? Aufl.: 90kg. — A. 249. Was wiegt ein Holzblock, 3m lang, 0,5m breit, der 0,2m tief in Wasser taucht? Aufl.: 300kg. — A. 250. Wie tief sinkt ein kupferner Cylinder (spec. G. = 9) von 10cm Durchm. und Höhe in Quecksilber ein? Aufl.: $x \,.\, 13{,}6 = 10 \,.\, 9$, hieraus $x = 6{,}6$cm. — A. 251. Wie tief sinkt eine silberne Kugel (sp. G. = 10) in Quecksilber ein, $r = 10$cm? Aufl.: $\frac{4}{3}\pi r^3 \,.\, 10 = \frac{1}{3}\pi x^2 (3r - x) \,.\, 13{,}6$, woraus $x = 13{,}2$cm. — A. 252. Wie tief muß ein kegelförmiger Eisberg, der außerhalb des Wassers 60m hoch und 100m weit ist, in das Wasser eintauchen; sp. G. des Eises = 0,9?

$$\text{Aufl.: } \frac{1}{3} \cdot \frac{\pi r^2 (h + x)^2}{h^2} \cdot (h + x)\, 0{,}9 = \frac{x}{3} \left[\frac{(h + x)^2 \pi r^2}{h^2} + \frac{(h + x)\pi r^2}{h} + \pi r^2 \right],$$

woraus $x = h(\sqrt[3]{10} - 1) = 69{,}264$m. — A. 253. Wenn der Eisberg etwa ein rechteckiger Körper ist und 1000m Länge, 200m Breite und 100m Höhe hervorragen, wie tief muß er dann eingetaucht sein, und welches Volumen besitzt der eingetauchte Theil? Aufl.: $x = 900$m; eingetauchtes Volumen = 180 Mill. cbm. — A. 254. Welche Last würde dieser Eisberg tragen können, wenn er durch dieselbe ganz eintauchen sollte? Aufl.: 20000 Mill. kg (Erratische Blöcke). — A. 255. Wie viel kg Kork müssen mit einem kg Silber verbunden werden, damit dasselbe im Wasser schwebt? Aufl.: $\frac{1}{10} + \frac{x}{0{,}24} = 1 + x$, woraus $x = \frac{27}{95}$kg. — A. 256. Wie viel Kork muß ein Mensch von 60kg und 1,2 sp. G. mit sich verbinden, um natürlich zu schwimmen? Aufl : $60 / 1{,}2 + x / 0{,}24 = 60 + x$, woraus $x = 3\frac{3}{19}$kg. — A. 257. Ein Kasten von Kupferblech, dessen qcm 3g wiegt, und welcher 50cm lang, 30cm breit und 20cm hoch ist, schwimmt wie tief im Wasser? Aufl.: 12,4cm. — A. 258. Wie tief taucht eine Hohlkugel von 20cm Dm. aus diesem Blech in Wasser ein? Aufl.: $\pi \,.\, 20^2 \,.\, 3 = \frac{1}{3}\pi x^2 (30 - x)$, woraus $x = 16$cm. — A. 259. Die Krone des Hiero von Syracus wog 10kg; was mußte sie im Wasser verlieren, wenn sie reines Gold oder reines Silber war? Aufl.: Gold ½kg, Silber 1kg, wenn sp. G. des Goldes = 20, des Silbers = 10. — A. 260. Was mußte sie verlieren, wenn sie 6kg Gold und 4kg Silber enthielt? Aufl.: $\frac{6}{20} + \frac{4}{10} = 0{,}7$kg. — A. 261. Sie verlor 0,625kg, wie viel Gold und Silber enthielt sie demnach? Aufl.: $x / 20 + (10 - x) / 10 = 0{,}625$, woraus $x = 7{,}5$kg Gold und 2,5kg Silber.

164 **Bestimmung des specifischen Gewichtes.** Das specifische Gewicht eines Körpers ist, wie schon in 19. angeführt, das Gewicht der Volumeinheit desselben. Bei festen und tropfbar flüssigen Körpern wird die Volum- und die Gewichtseinheit so gewählt, daß das spec. Gewicht des Wassers = 1 ist; hierüber belehrt folgende Zusammenstellung:

Volumeneinheit.			Zugehörige Gewichtseinheit.
1 Cubikmeter oder Kiloliter	Wasser	wiegt	1 Tonne = 1t
1 Cubikdecimeter oder Liter	„	„	1 Kilogramm = 1kg
1 Cubikcentimeter	„	„	1 Gramm = 1g
1 Cubikmillimeter	„	„	1 Milligramm = 1mg.

Bei Gasen wählt man häufig das Cubikmeter als Volumeinheit und das Kilogramm als Gewichtseinheit, oder das Cubikdecimeter als Volum-, das Gramm als Gewichtseinheit, versteht also unter dem spec. Gew. der Gase manchmal die Zahl der Kilogramme, die ein Cubikmeter des Gases wiegt. Bei den festen und flüssigen Körpern aber gibt nach obiger Feststellung das spec. Gew. an, wie viele Tonnen ein Cubikmeter, wie viele Kilogramm ein Cubikdecimeter, wie viele Gramm ein Cubikcentimeter und wie viele Milligramm ein Cubikmillimeter des Körpers wiegt. Weil das Gewicht der Volumeinheit Wasser, also das spec. Gew. des Wassers = 1 ist, so gibt das spec. Gew. eines festen oder flüssigen Körpers auch an, wie viel mal so schwer ein beliebiges Volumen des Körpers ist als ein gleiches Volumen Wasser.

Bezeichnet man das Gewicht eines Körpers mit p, das Volumen desselben mit v und das spec. Gew. desselben mit s, so hat das Volum 1 das Gewicht s, mithin des Volum v ein vmal so großes Gewicht $vs = p$, woraus

$$1)\ p = v \,.\, s;\quad 2)\ v = p / s;\quad 3)\ s = p / v,$$

welche wichtigen Beziehungen in der Form an diejenigen zwischen dem Gewicht und der Masse eines Körpers, sowie der Beschleunigung der Schwere erinnern, oder allgemeiner an die Relationen zwischen einer Kraft, einer Masse und der Beschleunigung, welche die Kraft der Masse ertheilt. Wie sind die drei Beziehungen in Worten auszudrücken?

Da nach der dritten Beziehung das spec. Gew. eines Körpers gleich dem absoluten Gewichte desselben dividirt durch das Volumen desselben ist, da man also zur Bestimmung des spec. Gew. das abs. Gew. und das Volumen kennen muß, so ist es naturgemäß, die Bestimmung des specifischen Gewichtes mit solchen Fällen zu beginnen, in welchen die beiden nothwendigen Größen leicht der Messung zugänglich sind. Das Gewicht p bestimmt man mit Hilfe der Wage; die Ermittelung des Volumens v hat keine Schwierigkeit 1. bei festen Körpern, die eine einfache geometrische Gestalt haben; in diesem Falle kann die Bestimmung von v durch Berechnung geschehen; Beispiele: Würfel, Parallelepipedon, Prisma, Cylinder, Pyramide, Kegel, Kugel. 2. bei tropfbar flüssigen Körpern; hier benutzt man entweder ein Fläschchen, dessen Inhalt bekannt ist, z. B. = 10 Cubikcentimeter; bestimmt man in diesem Falle das Gewicht der von dem Fläschchen aufgenommenen Flüssigkeit in Grammen, so braucht das Komma an der Zahl des Gewichtes nur eine Stelle nach links gerückt zu werden, wodurch man sofort das spec. Gew. der Flüssigkeit hat. Oder man benutzt ein ganz willkürliches Fläschchen, dessen Inhalt man erst nach der zweiten Beziehung bestimmt; man füllt das Fläschchen mit einer beliebigen Flüssigkeit, deren spec. Gewicht bekannt ist (Wasser, Quecksilber), sucht das Gewicht der eingefüllten Flüssigkeit und berechnet dann v nach der Formel $v = p/s$. Hat man Wasser gewählt, so enthält das Fläschchen so viele Cubikcentimeter, als das Wasser Gramme wiegt.

Hat ein fester Körper eine unregelmäßige Gestalt, so kann man sich behufs Ermittelung des Volumens v einer hydrostatischen Wägung bedienen; erfährt der Körper in einer Flüssigkeit den Gewichtsverlust p′, so bedeutet p′ nach dem Archimedischen Princip das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit; hat diese ferner das spec. Gew. s′, so ist das Volum der verdrängten Flüssigkeit und somit auch das des festen Körpers $v = p'/s'$. Da nun das spec. Gew. des festen Körpers $s = p/v$, so ist s auch $= p/(p'/s') = (p'/p')\,s'$. Nimmt man die hydrostatische Wägung in Wasser vor, so ist speciell $s' = 1$, daher $s = p/p'$. Das specifische Gewicht eines festen Körpers ist gleich dem absoluten Gewichte desselben dividirt durch seinen Gewichtsverlust im Wasser. Der Beweis dieses Lehrsatzes für das spec. Gew. kann auch kurz so gefaßt werden: Wie viele Gramme ein Körper im Wasser von seinem Gewichte verliert, so viele Gramme beträgt das Gewicht des verdrängten Wassers, und ebensoviele Cubikcentimeter das Volumen des verdrängten Wassers, also auch das Volumen des Körpers. Dividirt man mit der Zahl dieser Cubikcentimeter in das absolute Gewicht in Grammen, so erhält man, wieviele Gramme ein Cubikcentimeter des Körpers wiegt, also das spec. Gew. desselben.

Die hydrostatische Wägung hat also den Zweck, das Volumen des festen Körpers zu bestimmen. In früherer Zeit faßte man das spec. Gewicht vorwiegend als die Verhältnißzahl auf, welche angibt, wie viel mal so viel ein Körper wiegt als ein gleiches Volumen Wasser. Bei dieser Auffassung hat die hydrostatische Wägung den Zweck, das Gewicht eines Wasserkörpers zu erfahren, dessen Volumen mit demjenigen des festen Körpers übereinstimmt; denn der Gewichtsverlust in Wasser gibt ja das Gewicht des verdrängten Wassers, also des dem Körpervolumen gleichen Wasservolumens an. Kennt man außerdem das Gewicht des Körpervolumens, so hat man nur noch dieses Gewicht durch das Gewicht des gleichen Wasservolumens, also durch den Gewichtsverlust zu dividiren, um zu erfahren, wie viel mal so viel der Körper wiegt als das gleiche Volumen Wasser, wodurch der Satz über das spec. Gew. auch von dieser Seite her klar wird.

165 Die hydrostatische Wägung kann geschehen mittels der hydrostatischen Wage und mittels Nicholsons Aräometer (ἀραιός, dünn, locker).

1. An den Haken der kurzen Wagschale hängt man mit feinen Fäden den zu prüfenden Körper und bestimmt durch Auflegen von Gewichten auf die andere Schale das absolute Gewicht; dann schiebt man unter den Körper ein Glas Wasser, so daß derselbe tief eintaucht; um das Gleichgewicht herzustellen, legt man Gewichte auf die kurze Schale; diese Gewichte geben den Gewichtsverlust; in Grammen ausgedrückt geben sie aber auch das Volumen des Körpers in ccm an.

2. Nicholsons Aräometer, Fig. 100. Man legt den Körper auf den Teller t und fügt so viel Gewicht zu, daß der Apparat bis zur Marke m ins Wasser sinkt, in welchem er vermöge der schweren Kugel s stabil schwimmt. Nimmt man nun den Körper weg und legt an seine Stelle Gewichte, welche wieder das Einsinken bis zur Marke bewirken, so sind die Zulagegewichte das absolute Gewicht des Körpers. Werden auch diese weggenommen und der Körper in das Körbchen k gebracht, so müssen abermals Gewichte auf den Teller t gelegt werden, um das Einsinken bis zur Marke zu veranlassen, und diese geben den Gewichtsverlust in Wasser, also auch das Volumen in ccm an.

Fig. 100.

Diese Apparate können auch zur Bestimmung der spec. Gewichte der Flüssigkeiten benutzt werden. Sucht man mittels der hydrostatischen Wage den Gewichtsverlust eines Messingwürfels in Wasser, so hat man das Gewicht eines gleich großen Wasserwürfels; ermittelt man dann in derselben Weise den Gewichtsverlust desselben Würfels in einer anderen Flüssigkeit, so kennt man das Gewicht eines gleichen Würfels dieser Flüssigkeit. Dividirt man das letztere Gewicht durch das erstere, so erhält man das sp. G. der Flüssigkeit.

Kennt man das Gewicht des Nicholson'schen Aräometers, und addirt hierzu die Zulaggewichte, welche das Einsinken bis zur Marke bewirken, so erhält man das Gewicht des verdrängten Wasservolums; verfährt man ebenso für eine andere Flüssigkeit, und dividirt das letztere Gewicht durch das erstere, so gibt der Quotient das spec. G. der Flüssigkeit an.

Das Skalen-Aräometer. Volumeter von Gay-Lussac, Densimeter von Schmidt. Je leichter eine Flüssigkeit ist, desto tiefer muß ein und derselbe Körper in dieselbe einsinken, damit das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit demjenigen des Körpers gleich sei; die verdrängten Volumina müssen sich umgekehrt verhalten wie die sp. G. der Flüssigkeiten. Hierauf beruhen die Skalen-Aräometer, von welchen das Volumeter das sp. G. einer Flüssigkeit leicht berechnen läßt. Eine geschlossene, unten erweiterte und durch eine mit Quecksilber gefüllte Kugel stabil schwimmende Glasröhre trägt an dem Punkte, bis an welchen sie im Wasser einsinkt, die Zahl 100, und trägt über und unter diesem Punkte Theilstriche, an welchen das Volumen der Röhre um 0,01 größer oder kleiner ist. Sinkt ein Körper bis zu dem Striche 125, so verhält sich das spec. Gew. der Flüssigkeit zu dem des Wassers, wie 100 : 125, ist also = 0,8. — Bei dem Densimeter läßt sich an den Theilstrichen das sp. G. selbst ablesen.

Ist ein Körper im Wasser löslich, so bestimmt man nach einer dieser Methoden, wie viel mal schwerer er ist als eine andere Flüssigkeit, wie Weingeist oder Oel, die ihn nicht löst, deren spec. G. aber schon bekannt ist; das Product dieser beiden Zahlen ergibt dann das gesuchte sp. G. — Ebenso kann man mit Körpern verfahren, die leichter sind als Wasser; oder man kann sie auch mit schwereren Körpern verbinden und von dem Gewichtverluste der Verbindung denjenigen des schwereren Körpers abzählen, wodurch man den des leichteren, d. h. das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser erhält. — Bei sehr genauen Bestimmungen, die einen wissenschaftlichen Werth und Zweck haben sollen, muß man auch auf die Reinheit und Temperatur des Wassers, auf Luftblasen und Wasserabsorption, auf das Gewicht der Aufhängefäden u. drgl. aufmerksam sein.

166 Luftförmige Körper. Man pumpt einen zum Aufhängen an einer Wage eingerichteten Glasballon luftleer und bringt ihn dann an der Wage ins Gleichgewicht. Läßt man dann Luft einströmen, so sinkt der Ballon; die Gewichte, die man zur Herstellung des Gleichgewichtes auf die andere Schale zulegen muß, geben das Gewicht der eingeströmten Luft an. Ebenso findet man das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser und erfährt dann durch Division, daß die Luft das spec. Gewicht 0,001293 hat, d. h. etwa 777 mal leichter ist als Wasser. Weil bei der Vergleichung von Luftarten mit Wasser zu kleine Zahlen entstehen, die unserem Vorstellungsvermögen wenig zusagen, so legt man für das sp. G. der Luft- und

Dampfarten auch die atmosphärische Luft zu Grunde. Indem man den genannten Ballon mit anderen Luft- oder Dampfarten füllt und die zur Herstellung des Gleichgewichtes nöthigen Zulagegewichte mit denen des ersten Versuches vergleicht, findet man die sp. Gewichte solcher Luftarten.

Diese Methode ist ungenau wegen der Veränderung des Glasballons mit dem Drucke, mit der Temperatur und mit der Luftart, wegen des Gewichtverlustes, den der Ballon auch in der Luft erleidet u. s. w.; Regnault hat daher in neuerer Zeit die Methode vervollkommnet. Die genaue Bestimmung der Dampfdichte gehört der Wärmelehre an.

167

Tafel einiger specifischen Gewichte bei 0° C.

Platin	22,1	Jod	4,95	Bernstein	1,08	Brom	2,97	Joddampf	8,72
Gold	19,3	Schwerspath	4,43	Wachs	0,97	Schwefelſ.	1,85	Schwefeld.	6,65
Wolfram	17,6	Diamant	3,52	Eis	0,88	Salpeterſ.	1,54	Quecksilberd.	6,98
Blei	11,4	Flintglas	3,44	Ebenholz	1,23	Salzsäure	1,19	Chlor	2,45
Silber	10,5	Krystallglas	2,89	Eichenholz	1,17	Glycerin	1,26	Flußsäure	2,37
Kupfer	8,88	Flaschenglas	2,60	Ahorn	0,90	Milch	1,03	Schwefl. S.	2,25
Messing	8,39	Spiegelglas	2,37	Buchenholz	0,80	Meerwasser	1,03	Salzſ.-G.	1,25
Stahl	7,82	Marmor	2,83	Tannenholz	0,70	Rheinwein	0,99	Kohlendioxyd	1,52
Schmiedeeiſ.	7,79	Quarz	2,65	Erlenholz	0,60	Leinöl	0,95	Sauerstoff	1,10
Zinn	7,29	Gyps	2,31	Lindenholz	0,50	Baumöl	0,92	Stickstoff	0,97
Gußeisen	7,21	Schwefel	2,03	Pappelholz	0,40	Erdöl	0,84	Ammoniak	0,60
Zink	7,21	Alabaster	1,87	Korkholz	0,24	Alkohol	0,79	Wasserdampf	0,62
Antimon	6,71	Elfenbein	1,92	Quecksilber	13,59	Aether	0,71	Wasserstoff	0,07

Das sp. G. gibt ein Urtheil darüber, wie schwer, im gewöhnlichen Sinne gesprochen, die Stoffe im Verhältnisse zu einander sind. Das spec. Gew. des Platins ist 22, d. h. 1^{ccm} Platin wiegt 22^{g}, das Platin ist 22 mal so schwer als Wasser, es ist der schwerste von allen Körpern. Das sp. G. des Diamantes ist $3\frac{1}{2}$, d. h. 1 hessischer Cubikzoll Diamant, wie der Diamant des türkischen Kaisers, wiegt $3\frac{1}{2}$ Loth (denn 1 c″ hess. Wasser wiegt 1 Loth). Das spec. Gew. des Quecksilbers ist 13,6, d. h. 1^{cdm} oder 1^{l} Quecksilber wiegt $13{,}6^{kg}$, das Quecksilber ist fast 14 mal schwerer als Wasser, es ist die schwerste Flüssigkeit. Blei ist halb so schwer als Platin, Kupfer doppelt so schwer als Schwerspath, 8 mal so schwer als Bernstein, 37 mal so schwer als Korkholz; Platin, der schwerste Körper, ist 230 000 mal so schwer als Wasserstoff, der leichteste Körper; Wasser ist mehr als 10 000 mal so schwer, wie sein Hauptelement, der Wasserstoff.

Nach dem Metersystem, das wir auch in der Lehre vom sp. Gew. vollständig durchgeführt haben, ist die Berechnung des Gewichtes irgend eines bekannten Körpervolumens eine einfache Aufgabe: man hat einfach das Volumen mit dem sp. G. zu multipliciren, $p = vs$. Bei den alten Maß- und Gewichtssystemen mußte man für derartige Rechnungen, wie in den Aufgaben 284 bis 289 einige vorkommen, das Gewicht γ einer Volumeinheit, z. B. von 1 Cubikfuß (c′) Wasser kennen; dann ist $p = vs\gamma$. Ein preußischer c′ Wasser wog 61,74 ℔., ein badischer c′ 54 ℔., ein hessischer c′ 31,75 ℔.

168

Vergleichung der Dichte von Flüssigkeiten. In vielen Fällen des practischen Lebens ist es von Interesse, die Dichten mehrerer Flüssigkeiten derselben Art zu vergleichen; Salzsoolen, Zuckerlösungen, Most, Schwefelsäure u. s. w. sind um so besser, je dichter sie sind, je weniger tief also ein und dasselbe Aräometer in diese Flüssigkeiten einsinkt; Weingeist, Branntwein u. dgl. sind um so besser, je mehr sie reinen Alkohol enthalten, je weniger dicht sie also sind und je tiefer ein Aräometer in dieselben einsinkt. Man hat daher an beliebigen Schimmwagen, Senkwagen, Aräometern beliebige Skalen angebracht und schätzt die Flüssigkeiten nach den Graden, bis zu welchen das Aräometer einsinkt. Leider sind bei den meisten Aräometern, von Beaumé, Cartier, Beck u. s. w., die Anfangspunkte und die Skalen ganz willkürlich gewählt, und haben diese daher wohl praktischen, aber keinen wissenschaftlichen Werth. Nur die Procent-Aräometer (für Alkohol von Gay-Lussac und Tralles) und die Oechsle'sche Mostwage machen hiervon eine Ausnahme.

Bei gemischten Flüssigkeiten würde man den Gehalt derselben aus dem spec. G. der Bestandtheile und der Mischung berechnen können, wenn das spec. G. der Mischung das arithmetische Mittel aus den sp. Gew. der Bestandtheile wäre. Wenn dies auch manchmal der Fall ist, so gilt es doch meistens dann nicht, wenn die Mischung mit einer Lösung oder einer chemischen Einwirkung verbunden ist. So findet bei dem Mischen von Alkohol mit Wasser eine Raumverminderung statt, welche aber ebenfalls nicht einem bestimmten Gesetze

gehorcht. Man hat daher durch Versuche alkoholometrische Tabellen aufgestellt, welche für jeden beliebigen Alkoholgehalt das spec. G. der Mischung angeben. Hat man demnach Aräometer, welche sp. G. angeben, so kann man aus einer solchen Tabelle den Alkoholgehalt entnehmen, wenn man das sp. G. einer Mischung mit einem solchen Aräometer gefunden hat. Besonders brauchbar sind dieselben, wenn sie auf der Skale gerade diejenigen sp. G. enthalten, die nach den Tabellen einem bestimmten Procentgehalte von Weingeist entsprechen; dies ist bei den Alkoholometern von Tralles der Fall, welchen auch noch erweiterte Tabellen für verschiedene Temperaturen beigegeben sind, und welche in Deutschland zum gesetzlichen Messen des Spiritus eingeführt wurden. — In ähnlicher Weise gibt die Oechsle'sche Mostwage den Procentgehalt des Mostes an Traubenzucker an; 100 Grade entsprechen 20, 60 Grade 12 Gewichtprocenten Zucker. Doch ist das Resultat einer solchen Messung nicht ganz zuverlässig, weil auch noch andere Stoffe Einfluß auf die Dichte des Mostes haben. Gleiches gilt von den Salzspindeln, Soolwagen u. s. w.; noch unzuverlässiger sind die Milchwagen; für Bier und Wein sind Aräometer als Maß der Güte ganz verwerflich.

169 **Aufg.** 262. Ein Stück Zink von 12^{ccm} wiegt 86,52g; welches ist das sp. G. des Zinkes? Aufl.: 86,52 / 12 = 7,21. — A. 263. Stücke Silber, Kupfer, Schwerspath, Marmor, Quarz von 10, 11, 12, 13, 14^{ccm} wiegen bezüglich 105; 97,68; 53,16; 36,79; 37,1g; berechne die spec. Gew. — A. 264. Ein Schoppen Quecksilber wiegt 13,6 ℔.; wie groß ist das sp. G.? — A. 265. Ein Liter Schwefelsäure wiegt 1533g; wie groß ist das sp. G.? Aufl.: 1,533. — A. 266. Ein Stück Platin von 1^{kg} verliert in Wasser 45g; sp. Gew.? Aufl.: $22^{2}/_{9}$. — A. 267. Ein Stück Eisen von 3^{kg} wiegt in Wasser 2,6^{kg}; sp. Gew.? Aufl.: 7,5. — A. 268. Ein Stück Sandstein von 2,4^{kg} wiegt in Wasser 1,4^{kg}; sp. G.? Aufl.: 2,4. — A. 269. Ein Stückchen Flußspath wird auf den Teller der Senkwage gelegt; dazu müssen für das Einsinken bis zur Marke 19,3g und dann an seine Stelle 3,1g; wenn es in das Körbchen gelegt wird, dürfen auf dem Teller nur 21,4g liegen; sp. G.? Aufl.: 3,1. — A. 270. Auf dem Teller liegen 30,5g; neben einem Stückchen Quarz nur 26,3g; wenn der Quarz im Körbchen liegt, dagegen 28,9g; spec. G.? Aufl.: $2^{5}/_{8}$. — A. 271. Ein Stück Ahornholz von 3,6g wiegt in absolutem Alkohol 0,44g; sp. G.? Aufl.: 0,9. — A. 272. Ein Stück Buchenholz von 3g verliert in Aether 2,66g; sp. G.? Aufl.: 0,8. — A. 273. Ein Stück Kochsalz von 4,5g verliert in Leinöl 2,14g; sp. G.? Aufl.: 2. — A. 274. Ein Stück Kupfervitriol von 6g verliert in Erdöl 2,3g; sp. G.? Aufl.: 2,1. — A. 275. Ein Messingwürfel von 3^{ccm} Inhalt verliert mit einem Stück Holz von 3,5g Gewicht in Wasser 8g; sp. G. des Holzes? Aufl.: 0,7. — A. 276. Eine Messingkugel von 16,78g wiegt mit einem Stücke Wachs von 1,94g in Wasser zusammen 14,72g; sp. G. des Wachses? Aufl.: 0,97. — A. 277. Ein Stück Zink wiegt 36,05g; welches ist sein Volumen? Aufl.: 5^{ccm}. — A. 278. Ein Stück Eis wiegt 88g; Vol.? Aufl.: 100^{ccm}. — A. 279. Mittels Kopps Volumenometer fand man das Volumen von 1000g gepulvertem Bimsstein 465^{ccm}, Stärkemehl 641^{ccm}, Flachs 690^{ccm}, roher Seide 640^{ccm}, Baumwolle 787^{ccm}; sp. G.? Aufl.: 2,15; 1,56; 1,45; 1,56; 1,27. — A. 280. Ein Tausendgranfläschchen, d. i. ein Fläschchen, das 1000 Gran Wasser faßt, faßt 13 598 Gran Quecksilber, 2966 Gran Brom, 1848 Gran Schwefelsäure, 1272 Gr. Schwefelkohlenstoff, 1022 Gr. Malaga, 872 Gr. Terpentinöl, 868 Gr. Benzol, 715 Gr. Aether; spec. Gew.? Aufl.: 13,598; 2,966; 1,848; 1,272; 1,022; 0,872; 0,868; 0,715. — A. 281. Ein Platinwürfel verliert in Wasser 2g, in Quecksilber 27,2g; spec. G.? Aufl.: 13,6. — A. 282. Eine Glaskugel verliert in Wasser 7,325g, in Weingeist 5,86g; sp. G.? Aufl.: 0,8. — A. 283. Ein Aräometer wiegt 13,5g; in Wasser muß man für das Einsinken bis zur Marke 7g, in Spiritus 2,9g zulegen; sp. Gew.? Aufl.: 0,8. — A. 284. Was wiegt ein rechteckiges Stück Quarz, 15^{cm} hoch, 8^{cm} breit, 6^{cm} dick; spec. Gew. = 2,654? Gewicht $P = 15 \,.\, 8 \,.\, 6 \,.\, 2{,}654 = 1910{,}88$g. — A. 285. Was wiegt eine gußeiserne walzenförmige Stange von 5^{cm} Durchmesser und 120^{cm} Höhe? $P = {}^{1}/_{4} \,.\, 3{,}1416 \,.\, 5^2 \,.\, 120 \,.\, 7{,}21 =$ 16 988g = 17^{kg} ca. — A. 286. Wie groß müßte ein goldener Würfel sein, um 1 Million fl. werth zu sein, wenn das spec. Gewicht des Goldes 19,258 ist und 1^{kg} Gold 1600 fl. kostet?

Zahl der kg = $^{1\,000\,000}/_{1\,600} = 625$.
Seite des Würfels = x^{cm}
Inhalt des Würfels = x^{3ccm}
Gewicht des Würfels = 19,258 x^{3}g

Daher die Gleichung
$$19{,}258\, x^3 = 625 \,.\, 1000$$
Daraus $x = \sqrt[3]{\frac{625000}{19{,}258}} = 31{,}897^{cm}$

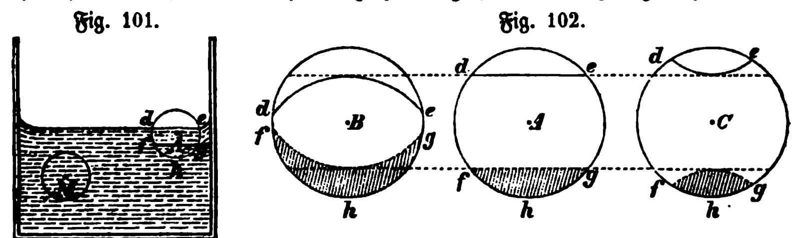
A. 287. Wie groß müßte ein Kegel von Ahornholz von gleicher Weite und Höhe sein, um 2^{kg} zu wiegen, wenn das sp. G. des Ahorns = 0,76 ist? Weite und Höhe = 21,582^{cm}. — A. 288. Was wog in Baden ein Sandstein von 5′ Länge, 2′ Breite und 3′ Höhe; $P = 5 \,.\, 2 \,.\, 3 \,.\, 54 \,.\, 2{,}45 = 3969$ ℔. — A. 289. Was wog in Preußen ein gußeiserner Dampfcylinder ohne Boden und Deckel von 5′ Höhe, 2′ lichter Weite und 3″ Metalldicke? $P = \pi (R^2 - r^2) hs\gamma = \pi \,.\, 27 \,.\, 3 \,.\, 60 \,.\, 7{,}21 \,.\, 61{,}74 / 1728 = 3933{,}18$ ℔.

3. Molekularwirkungen der Flüssigkeiten.

Die Flüssigkeitshaut (Robert Norman 1580, Laplace 1819). Die Flüssigkeitshaut ist die äußerste Oberflächenschicht einer Flüssigkeit; sie hat eine größere Cohäsion als die Flüssigkeit im Innern und übt einen Druck auf die Flüssigkeit aus, den man Oberflächenspannung nennt. Ueber diese bestehen folgende Gesetze: 1. Die Oberflächenspannung ist in einer convexen Oberfläche größer als in einer ebenen, und zwar um so größer, je schärfer die Convexität ist. 2. Die Oberflächenspannung ist in einer concaven Oberfläche kleiner als in einer ebenen, und zwar um so kleiner, je schärfer die Concavität ist. 170

Ein Theilchen M (Fig. 101) im Innern einer Flüssigkeit wird innerhalb der Sphäre, in welcher die Anziehung auf dasselbe wirken kann, von allen Seiten gleich stark angezogen, so daß die Anziehungen einander aufheben. Für ein Theilchen A an der Oberfläche aber heben sich zwar auch die Anziehungen der Schicht defg gegenseitig auf; aber die Anziehung des Segments fhg wird nicht aufgehoben. Die Oberflächentheilchen erfahren also eine Anziehung nach unten, üben also auf die Flüssigkeit einen Druck aus, die Oberflächenspannung, und sind hierdurch schwerer aus ihrer Lage zu bringen, bilden die Flüssigkeitshaut.

Fig. 101. Fig. 102.



Die Gesetze der Oberflächenspannung ergeben sich leicht aus Fig. 102, wo die Anziehungssphäre eines Moleküls stark vergrößert dargestellt ist, in A für die ebene Oberfläche de, in B für die convexe Oberfläche de, und in C für die concave Oberfläche de; in allen drei Fällen ist die flüssige Masse, deren Anziehung nach unten nicht aufgehoben ist, mit fhg bezeichnet. Für die convexe Oberfläche ist der nach unten anziehend wirkende Theil größer als für die ebene, und für die concave Oberfläche ist der nach unten anziehend wirkende Theil kleiner als für die ebene; und für die convexe Oberfläche ist der nach unten anziehend wirkende Theil um so größer, je schärfer die Krümmung ist; aber für die concave Oberfläche ist der nach unten anziehend wirkende Theil um so kleiner, je schärfer die Krümmung ist, womit die Gesetze dargethan sind.

Die Flüssigkeitshaut wird nachgewiesen durch auf Wasser zu legende, gebrauchte Nähnadeln, welche eine leichte Einbiegung der Oberfläche veranlassen wie auf einer feinen Haut, durch Wasserinsecten, die unbenetzt über die Flüssigkeit hinlaufen. Sie kommt zur Wirkung bei Seifenblasen, die sich vermöge der Oberflächenspannung zusammenziehen, und vermöge derselben ihre Kugelform haben, bei den Luftblasen in Flüssigkeiten, bei der Bildung von Tropfen, besonders von hängenden Tropfen, bei Flüssigkeiten, die in größerer Menge an festen Körpern vermöge der Adhäsion zu denselben hängen, wie bei den Plateau'schen Figuren. Dieselben erhält man, wenn man Drahtnetzkörper eintaucht in die Plateau'sche Flüssigkeit, aus 2 Maß Glycerin und 3 Maß Seifenbrühe bestehend, oder in die Böttcher'sche Flüssigkeit (2 Theile fein geschabte Palmölseife in 30 Theilen destillirten Wassers heftig umgerührt und mit 1/8 bis 1/10 der Mischung Glycerin versetzt). Daß die Oberflächenspannung mit der Form sich ändert, zeigt man mit einer Knieröhre, in deren längeren Schenkel man langsam Wasser gießt; zuerst zeigt sich an der Oeffnung des kürzeren Schenkels eine concave, dann eine ebene und endlich eine convexe Oberfläche. Die Flüssigkeitshaut kommt besonders zur Wirkung bei der Capillarität.

Die Capillarität (Leonardo da Vinci 1452—1519, Laplace 1819). Die Lehre von der Capillarität umfaßt die Erscheinungen, welche bei dem Zusammenwirken der Oberflächen fester und flüssiger Körper stattfinden. Diese Erscheinungen sind verschieden, je nachdem die Prosaphie (s. 76.) gegen den festen Körper größer oder kleiner ist als die Synaphie. 171

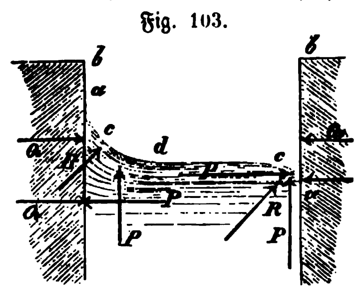
1. Ist die Prosaphie größer als die Synaphie, so finden folgende Erscheinungen statt:

a. Die Flüssigkeit bildet auf dem festen Körper keine Tropfen, sie zerfließt und benetzt ihn. Beispiele: Wasser auf Glas, Quecksilber auf Zinn oder Zink.

b. Die Flüssigkeit zieht sich an dem eingetauchten festen Körper oder an der Gefäßwand, die aus dem festen Körper besteht, in einer concaven Curve aus der freien Oberfläche hinaus.

Denn auf einen Flüssigkeitstheil an der Wand (Fig. 103 links) wirkt nach unten die Synaphie P, senkrecht gegen die Wand hin aber die Prosaphie Q des Wandtheiles über, und des Theiles unter der Oberfläche und senkrecht von der Wand weg ebenfalls die Cohäsion P; die letztere Kraft wird von dem unteren Q aufgehoben, hebt aber dieses, da Q > P, nicht ganz auf; es bleibt somit ein Rest von dem unteren Q, der mit dem oberen Q und dem senkrecht nach unten gerichteten P eine Resultante R hat, die schief in die Wand hineingerichtet ist. Die Oberfläche einer Flüssigkeit aber muß auf der dieselbe bildenden Kraft senkrecht stehen; folglich ist die Oberfläche schief nach unten von der Wand ab gerichtet, schließt mit der Wandfläche über der Flüssigkeit einen Winkel bac, **Randwinkel** genannt, ein, der z. B. für Wasser gegen Glas 150—180° beträgt. Für weiter nach innen, nach d zu, gelegene Wassertheile wird die Prosaphie bald verschwindend klein; an ihrer Stelle wirkt aber die an der Wand verdichtete Flüssigkeit durch ihre hierdurch vergrößerte Synaphie, die indessen doch kleiner als die Prosaphie ist und mit der Verdichtung nach d zu abnimmt; deßhalb muß die Resultante immer mehr der Richtung senkrecht nach unten näher kommen, die Oberfläche muß immer mehr wagrecht, ihr Winkel immer kleiner, bis zu 90° werden. Hieraus erklärt sich die concave Form der Randflüssigkeit. Mit dieser concaven Form ist auch ein Hinanziehen, also ein Heben der Flüssigkeit verbunden. Die Menge der Flüssigkeit in mg, welche an einer Längeneinheit der Contactlinie hängt, also an 1mm, wird **Capillaritätscoëfficient** genannt.

Fig. 103.



c. Die Oberfläche der Flüssigkeit in einer engen Röhre ist concav, bildet einen concaven Meniskus (μηνίσκος ein kleiner Mond).

d. In einer eingetauchten sehr engen (Haar- oder Capillar-) Röhre steht die Flüssigkeit höher als außerhalb derselben, eine Erscheinung, die man **Capillar-Attraction** oder Haarröhrchen-Anziehung nennt.

Denn innerhalb des Röhrchens wäre (nach 170.) wegen der concaven Oberfläche der Druck nach unten geringer als außerhalb desselben, wenn die Höhe der Flüssigkeit beiderseits dieselbe wäre; damit die Gleichheit des Druckes hergestellt werde, muß die Flüssigkeit in dem Röhrchen so hoch steigen, bis das Gewicht der gestiegenen Flüssigkeit dem fehlenden Druck gleich ist. Die Concavität des Meniskus ist nun aber um so stärker, je enger das Röhrchen ist; und je stärker die Concavität ist, um so größer wird der fehlende Druck; je größer aber dieser ist, desto höher muß die Flüssigkeit steigen. Folglich muß die Flüssigkeit in einem Capillargefäße um so höher stehen, je enger dasselbe ist. Eine genauere theoretische Untersuchung von Laplace (1819) ergab, was schon Borelli (1655) beobachtet hatte, und was Gay-Lussac durch genaue Messungen mit dem Kathetometer bestätigt fand, daß in cylindrischen Röhren die Höhen sich umgekehrt wie die Durchmesser verhalten. Wenn also z. B. in einer Röhre von 1mm Weite Wasser 30mm, Weingeist 12mm, Terpentinöl 13mm hoch steht, so stehen diese Flüssigkeiten in Röhren von 0,1mm Weite bezüglich 300, 120 und 130mm hoch. Weiter fanden Laplace und Gay-Lussac, daß zwischen parallelen Wänden die Flüssigkeit nur halb so hoch steht wie in cylindrischen Röhren von gleicher Weite, daß zwischen zwei gegeneinander geneigten Wänden die Oberfläche in Hyperbelform ansteigt, sowie daß in einer aus Flüssigkeit herausgezogenen Röhre eine doppelt so hohe Flüssigkeitsäule hängen bleibt, als sie in einem eingetauchten Haarröhrchen steht. Diese letztere Thatsache zeigt besonders deutlich, daß die Adhäsion wohl die Grundursache, aber für sich nicht ausreichend zur Erklärung der Capillar-Erscheinungen ist; denn jene Thatsache erklärt sich nur durch den convexen Meniskus an der unteren Oeffnung des Röhrchens, welcher nach 170. einen Druck nach oben ausübt, der um eben so viel über demjenigen der ebenen Haut steht, als dieser über dem Drucke des ganz gleichen concaven Meniskus am oberen Ende des gehobenen Wassersäulchens.

Die Capillar-Attraction erklärt: das Aufsteigen z. B. von Kaffee in einem nur mit der Spitze eingetauchten Stückchen Zucker, das Aufsteigen von Feuchtigkeit im Boden, in feucht liegenden Sandhaufen, in feucht stehenden Mauern (Mauersalpeter), das Eindringen von Flüssigkeiten in poröse Gegenstände, das Sickern durch poröse Wände (Thonzellen, Alkarazzas, Drainröhren), das Aufsaugen von Flüssigkeiten durch Schwämme, Fließpapiere, Tücher, Humus, durch die menschliche Haut (Nutzen der Bäder), die Endosmose und das Aufsteigen von Pflanzensaft in den Saftgefäßen, wie die Bewegung von thierischen Flüssigkeiten. Man benutzt die Capillarität in den Lampendochten, in welchen sich die Brennflüssigkeit durch diese Kraft hebt, zum Sprengen von Felsen mittels befeuchteter Keile, zum Krümmen von Hölzern mittels Wasser einer- und Feuer andererseits, zum Aufsaugen von Lymphe mittels dünner Röhrchen, zum Sprengen von Schädeln mittels angefeuchteter Erbsen, zum Anschwellen und dadurch zum Verkürzen von Tüchern und Seilen (der Obelisk von Luxor), zur Herstellung verlechter Holzgefäße mittels eingegossenen Wassers, zu der Spielerei, Wasser ohne Gießen und Fließen aus einem Gefäß in ein anderes zu befördern mittels Faserbündel, die aus dem Wasser in das andere Gefäß hineingehen u. s. w.

e. Ein Tropfen in einem kegelförmigen Haarröhrchen oder zwischen zwei geneigten Platten bewegt sich nach den engeren Raumtheilen hin; denn der weitere Meniskus hat weniger Krümmung als der engere, übt daher einen größeren Druck als dieser aus.

f. Leichte schwimmende Gegenstände z. B. Kugeln, oder an Fäden aufgehängte und in Flüssigkeit tauchende Platten bewegen sich zu einander, wenn sie nahe zusammenkommen.

g. Fließt eine Flüssigkeit unter spitzem Winkel aus einem Gefäße, so läuft sie leicht an der Wand herab; man kann abhelfen durch Befetten oder ein Ausflußstäbchen.

Als Ergänzung zu a. ist zu bemerken, daß auch eine adhärirende Flüssigkeit Tropfen bildet, wenn sie an der Unterfläche des festen Körpers hängt und in so großer Menge vorhanden ist, daß ihr Gewicht ihre Cohäsion und die Oberflächenspannung überwiegt. Sehr gründlich wurde diese Tropfenbildung untersucht von Guthrie 1865. Derselbe fand das Gewicht der Tropfen um so größer, je kleiner die Bildungszeit derselben, je weniger gekrümmt die Unterfläche des festen Körpers und je höher die Temperatur der Tropfen ist; auch ergab sich, daß das Tropfengewicht abhängt von der Adhäsion des festen Körpers und der Tropfen, und zwar, daß es dem Capillaritätscoëfficient proportional ist, und endlich, daß die Tropfengröße durch die Art der Cohäsion der Flüssigkeit bedingt ist; sie ist direct proportional der Steifigkeit und indirect der Festigkeit. Ja sogar die Beschaffenheit der Luft soll auf die Tropfen Einfluß haben.

Die Capillarität ist eine Stelle der Wissenschaft, von welcher aus man in das Geheimniß der Molekularkräfte einzubringen hofft; darum ist sie vielfach theoretisch und experimentell erforscht worden. Wichtig sind hierbei die Capillaritätsconstanten, nämlich der Randwinkel und der Capillaritätscoëfficient α; der letztere gibt nicht nur an, wieviele Milligramme eine Flüssigkeit unter einem Millimeter der obersten Grenzlinie der gehobenen Flüssigkeit, der Contactlinie hängen, steht also nicht nur im Zusammenhange mit dem Gewichte der Guthrie'schen Tropfen und mit den Dimensionen von Luftblasen, die unter einer festen Oberfläche hängend in einer berührenden Flüssigkeit schweben, sondern auch mit der Steighöhe in Haarröhrchen, da nach der Capillaritätstheorie der Quotient des doppelten Capillaritätscoëfficienten durch das spec. Gew. der Flüssigkeit gleich dem Product der Steighöhe mit dem Radius des Röhrchens ist; auch mit der Oberflächenspannung, also mit der Synaphie der Flüssigkeit, steht der Capillaritätscoëff. in Verbindung, da ebenfalls nach der Theorie dieser Coëff. gleich der halben Oberflächenspannung in 1^{qmm} einer Kugelfläche vom Radius 1 ist, und weil demnach die Oberflächenspannung in irgend einer flüssigen Kugel gefunden wird, indem man den doppelten Coëff. durch den Kugelradius dividirt; ja nach Lippmann (1877) besteht sogar ein Zusammenhang zwischen dem Capillaritätscoëff. und der elektromotorischen Kraft. Wegen dieser vielseitigen Bedeutung hat man auch den Coëff. auf verschiedene Art bestimmt: aus dem Gewichte hängender Tropfen, aus den Dimensionen hängender Blasen, aus der Steighöhe in Capillarröhren, aus der Zahl der Tropfen, die aus einem und demselben Volumen verschiedener Flüssigkeiten herabfallen u. s. w. Eine viel besprochene Bestimmungsart hat Wilhelmy (1863) angewendet: er hing Tafeln oder Cylinder an dem einen Arme einer feinen Wage auf, ließ sie bis zu einer bestimmten Höhe in Flüssigkeit tauchen und maß dann genau ihr Gewicht während des Eintauchens; dieses setzte er gleich dem Gewichte in der Luft vermindert um den Gewichtsverlust und vermehrt um das Gewicht $\alpha\lambda$ der adhärirenden Flüssigkeit, wobei λ den Umfang des Körpers im Niveau bedeutet; aus dieser Gleichung konnte er das unbekannte α berechnen. Nach diesen verschiedenen Methoden ergaben sich ziemlich übereinstimmende Werthe des Coëff., für Wasser etwa 7,5, Schwefelkohlenstoff 3,3, Steinöl 2,3, Alkohol 2,2, Aether 1,8, Quecksilber 55. Man nennt diese Zahl jetzt vorzugsweise Capillarconstante und definirt sie kurz so: die Capillarconstante ist das von einem Millimeter freier Flüssigkeitsoberfläche

getragene Gewicht; hiermit setzt man voraus, daß sie in einer und derselben Flüssigkeit unter allen Umständen dieselbe bleibe, also unabhängig sei von der Temperatur, von dem Stoff und der Form des berührenden festen Körpers u. s. w., was auch ältere Forscher durch Versuche bestätigt hatten; neuere Forscher dagegen und insbesondere Wilhelmy schlossen aus ihren Versuchen, daß eine und dieselbe Flüssigkeit gegen verschiedene feste oder flüssige Körper verschiedene Capillarconstanten haben könnte, ja daß sogar die Krümmung des festen Körpers und die Temperatur nicht ohne Einfluß auf ihre Größe sei. Quincke bestimmte (1863) die Capillarconstante vieler geschmolzenen Metalle und Salze und berechnete aus derselben die *specifische Cohäsion* der genannten Stoffe, d. i. den Quotient der Oberflächenspannung oder doppelten Capillarconstanten durch die Dichte, was auch gleich dem Product aus dem Radius der Capillarröhre mit der Steighöhe dividirt durch den Cosinus des Randwinkels ist; es ergab sich hierbei das interessante Resultat, daß viele flüssigen Metalle und Salze dieselbe spec. Cohäsion haben, und daß die verschiedenen spec. Cohäsionen einfache Multipla von 4,3 sind; so haben Quecksilber, Blei, Wismuth, die verschiedenen Salpeter und eine Anzahl von Chloriden die spec. Cohäsion 2 . 4,3, Wasser, Platin, Gold, Silber, Kupfer 4 . 4,3, Zink, Eisen, Palladium 6 . 4,3, Natrium 12 . 4,3 u. s. w. Derselbe Forscher untersuchte (1869) die Capillarconstanten zweier Flüssigkeiten gegen eine dritte oder feste Körper und fand auch hier beachtenswerthe Resultate. Eingehend untersuchte er (1876) die Capillarconstanten von wässerigen Lösungen der Salze und ihrer Säuren und fand, daß die der Salzlösungen größer und die der Säurelösungen kleiner sind als die des Wassers und zwar erstere um so größer und letztere um so kleiner, je concentrirter die Lösungen sind; dasselbe fand Duclaux (1878) auch für die wässerigen Lösungen von Fettsäuren und Alkoholen.

Der *Randwinkel* ist der Winkel, den das letzte Element der Flüssigkeitsoberfläche mit der berührenden Wand einschließt; früher nahm man den Winkel, den jenes Element mit der Wand *über* der Flüssigkeit einschließt, der also bei einer vollkommen benetzenden Flüssigkeit 180° beträgt; jetzt nimmt man den Winkel, den das Element mit der Wand *unter* der Flüssigkeit bildet, der also das Supplement des früheren und in dem angeführten Falle = 0 ist. Nach der Theorie ist der Randwinkel für eine und dieselbe Flüssigkeit constant, z. B. für Quecksilber 129°, für Steinöl 36°. Quincke zeigte (1877), daß der Randwinkel vieler Flüssigkeiten, wie Wasser, Alkohol, wässeriger und alkoholischer Salzlösungen gegen vollkommen reine Glas-, Krystall- und Metallflächen gleich Null ist und nur dann größere Werthe annimmt, wenn die feste Oberfläche mit einer unmerklich dünnen Schicht fremder Substanz (Staub-, Dunst- oder Wasserhaut) überzogen ist, mit deren Dicke sich der Randwinkel ändert. Dieser Einfluß fremder Schichten auf den Randwinkel dürfte nach Quinckes Meinung den Grund dafür bilden, daß die Resultate von Theorie und Erfahrung bei Bestimmung der Oberflächenspannung öfter voneinander abweichen.

Es wurde schon erwähnt, daß man sich die einen festen Körper berührende Flüssigkeitschicht verdichtet denkt und durch die Anziehung dieser verdichteten Flüssigkeit die Hebung entfernterer Schichten der Flüssigkeit erklärt, wogegen sich allerdings mancherlei einwenden läßt. Wilhelmy fand bei seinen Versuchen, daß an eingetauchten Körpern ein größeres Gewicht von Flüssigkeit hängen bleibt, als sich durch die Berechnung aus den Dimensionen der flüssigen Schicht ergibt, und glaubt hierdurch die Meinung bestätigt, daß dieselbe verdichtet sei. Er nannte die an der Einheit der Oberfläche verdichtete Flüssigkeitsmenge den *Verdichtungscoëfficient* (β), berechnete denselben aus Eintauchversuchen und fand ihn z. B. für Alkohol gegen Glas = 0,015. Röntgen tauchte nun (1877) dünne Glashäutchen von 80000^{qmm} Oberfläche in Alkohol; nach Wilhelmys Coëff. hätte diese Glasmasse eine Gewichtzunahme von 950^{mg} zeigen müssen, während eine solche durchaus nicht zu merken war, sondern nur die Abnahme durch den Gewichtsverlust, und August Schleiermacher stellte 1879 im physikalischen Institut von Kohlrausch eine Reihe von Versuchen an, durch welche dargethan wird, daß der Verdichtungscoëff. unmöglich die von Wilhelmy angegebene Größe erreichen, sondern höchstens $0{,}0001^{\text{mg}}$ auf 1^{qmm} betragen kann. Diese Vorgänge in der neueren Wissenschaft weisen darauf hin, daß das dunkle Gebiet der Molekularkräfte nur an der sicheren Hand mathematischer Führung betreten werden sollte, indem selbst die feinste Experimentirkunst nicht vor irrthümlichen Resultaten schützte. Es werden deshalb auch die Angaben zweifelhaft, welche aus Capillaritätsversuchen über den *Radius der Wirkungssphäre der Molekularkräfte* gezogen wurden und die Länge desselben auf etwa $0{,}00005^{\text{mm}}$ bestimmten, während die ältere Physik denselben für unmeßbar klein hielt und die kinetische Gastheorie den viel kleineren Werth $0{,}000\,0003^{\text{mm}}$ vermuthen läßt.

Schon (1858) hatte Quincke beobachtet, daß ein flacher Quecksilbertropfen nicht sofort nach seiner Entstehung seine definitive Gestalt annimmt, sondern im Verlaufe mehrerer Stunden seine Höhe und Breite ein wenig ändert, woraus sich ergibt, daß seine Oberflächenspannung abnimmt. Ausgedehntere Beobachtungen an flachen Luftblasen, die in verschiedenen Flüssigkeiten schwebten, ergaben für diese Flüssigkeiten dasselbe Resultat, daß ihre

Die Capillar-Attraction erklärt: das Aufsteigen z. B. von Kaffee in einem nur mit der Spitze eingetauchten Stückchen Zucker, das Aufsteigen von Feuchtigkeit im Boden, in feucht liegenden Sandhaufen, in feucht stehenden Mauern (Mauersalpeter), das Eindringen von Flüssigkeiten in poröse Gegenstände, das Sickern durch poröse Wände (Thonzellen, Alkarazzas, Drainröhren), das Aufsaugen von Flüssigkeiten durch Schwämme, Fließpapiere, Tücher, Humus, durch die menschliche Haut (Nutzen der Bäder), die Endosmose und das Aufsteigen von Pflanzensaft in den Saftgefäßen, wie die Bewegung von thierischen Flüssigkeiten. Man benutzt die Capillarität in den Lampendochten, in welchen sich die Brennflüssigkeit durch diese Kraft hebt, zum Sprengen von Felsen mittels befeuchteter Keile, zum Krümmen von Hölzern mittels Wasser einer- und Feuer andererseits, zum Aufsaugen von Lymphe mittels dünner Röhrchen, zum Sprengen von Schädeln mittels angefeuchteter Erbsen, zum Anschwellen und dadurch zum Verkürzen von Tüchern und Seilen (der Obelisk von Luxor), zur Herstellung verlechter Holzgefäße mittels eingegossenen Wassers, zu der Spielerei, Wasser ohne Gießen und Fließen aus einem Gefäß in ein anderes zu befördern mittels Faserbündel, die aus dem Wasser in das andere Gefäß hineingehen u. s. w.

e. Ein Tropfen in einem kegelförmigen Haarröhrchen oder zwischen zwei geneigten Platten bewegt sich nach den engeren Raumtheilen hin; denn der weitere Meniskus hat weniger Krümmung als der engere, übt daher einen größeren Druck als dieser aus.

f. Leichte schwimmende Gegenstände z. B. Kugeln, oder an Fäden aufgehängte und in Flüssigkeit tauchende Platten bewegen sich zu einander, wenn sie nahe zusammenkommen.

g. Fließt eine Flüssigkeit unter spitzem Winkel aus einem Gefäße, so läuft sie leicht an der Wand herab; man kann abhelfen durch Befetten oder ein Ausflußstäbchen.

Als Ergänzung zu a. ist zu bemerken, daß auch eine adhärirende Flüssigkeit Tropfen bildet, wenn sie an der Unterfläche des festen Körpers hängt und in so großer Menge vorhanden ist, daß ihr Gewicht ihre Cohäsion und die Oberflächenspannung überwiegt. Sehr gründlich wurde diese Tropfenbildung untersucht von Guthrie 1865. Derselbe fand das Gewicht der Tropfen um so größer, je kleiner die Bildungszeit derselben, je weniger gekrümmt die Unterfläche des festen Körpers und je höher die Temperatur der Tropfen ist; auch ergab sich, daß das Tropfengewicht abhängt von der Adhäsion des festen Körpers und der Tropfen, und zwar, daß es dem Capillaritätscoëfficient proportional ist, und endlich, daß die Tropfengröße durch die Art der Cohäsion der Flüssigkeit bedingt ist; sie ist direct proportional der Steifigkeit und indirect der Festigkeit. Ja sogar die Beschaffenheit der Luft soll auf die Tropfen Einfluß haben.

Die Capillarität ist eine Stelle der Wissenschaft, von welcher aus man in das Geheimniß der Molekularkräfte einzudringen hofft; darum ist sie vielfach theoretisch und experimentell erforscht worden. Wichtig sind hierbei die Capillaritätsconstanten, nämlich der Randwinkel und der Capillaritätscoëfficient α; der letztere gibt nicht nur an, wieviele Milligramme eine Flüssigkeit unter einem Millimeter der obersten Grenzlinie der gehobenen Flüssigkeit, der Contactlinie hängen, steht also nicht nur im Zusammenhange mit dem Gewichte der Guthrie'schen Tropfen und mit den Dimensionen von Luftblasen, die unter einer festen Oberfläche hängend in einer berührenden Flüssigkeit schweben, sondern auch mit der Steighöhe in Haarröhrchen, da nach der Capillaritätstheorie der Quotient des doppelten Capillaritätscoëfficienten durch das spec. Gew. der Flüssigkeit gleich dem Product der Steighöhe mit dem Radius des Röhrchens ist; auch mit der Oberflächenspannung, also mit der Synaphie der Flüssigkeit, steht der Capillaritätscoëff. in Verbindung, da ebenfalls nach der Theorie dieser Coëff. gleich der halben Oberflächenspannung in 1qmm einer Kugelfläche vom Radius 1 ist, und weil demnach die Oberflächenspannung in irgend einer flüssigen Kugel gefunden wird, indem man den doppelten Coëff. durch den Kugelradius dividirt; ja nach Lippmann (1877) besteht sogar ein Zusammenhang zwischen dem Capillaritätscoëff. und der elektromotorischen Kraft. Wegen dieser vielseitigen Bedeutung hat man auch den Coëff. auf verschiedene Art bestimmt: aus dem Gewichte hängender Tropfen, aus den Dimensionen hängender Blasen, aus der Steighöhe in Capillarröhren, aus der Zahl der Tropfen, die aus einem und demselben Volumen verschiedener Flüssigkeiten herabfallen u. s. w. Eine viel besprochene Bestimmungsart hat Wilhelmy (1863) angewendet: er hing Tafeln oder Cylinder an dem einen Arme einer feinen Wage auf, ließ sie bis zu einer bestimmten Höhe in Flüssigkeit tauchen und maß dann genau ihr Gewicht während des Eintauchens; dieses setzte er gleich dem Gewichte in der Luft vermindert um den Gewichtsverlust und vermehrt um das Gewicht $\alpha\lambda$ der adhärirenden Flüssigkeit, wobei λ den Umfang des Körpers im Niveau bedeutet; aus dieser Gleichung konnte er das unbekannte α berechnen. Nach diesen verschiedenen Methoden ergaben sich ziemlich übereinstimmende Werthe des Coëff., für Wasser etwa 7,5, Schwefelkohlenstoff 3,3, Steinöl 2,3, Alkohol 2,2, Aether 1,8, Quecksilber 55. Man nennt diese Zahl jetzt vorzugsweise Capillarconstante und definirt sie kurz so: die Capillarconstante ist das von einem Millimeter freier Flüssigkeitsoberfläche

Denn innerhalb des Röhrchens wäre (nach 170.) wegen der converen Oberfläche der Druck nach unten größer als außerhalb desselben, wenn die Höhe der Flüssigkeit beiderseits dieselbe wäre; damit die Gleichheit des Druckes vorhanden sei, muß demnach die Flüssigkeit in dem Röhrchen so tief stehen, daß der Druck des Meniskus und des Säulchens zusammen dem äußeren Drucke der ebenen Haut und der Flüssigkeit zusammen gleich seien. Diese Eigenschaft der Haargefäße nennt man Haarröhrchen-Abstoßung oder Capillar-Depression, dieselbe ist weniger wichtig als die Capillar-Attraction.

e. Ein Tropfen in einem kegelförmigen Haarröhrchen oder zwischen zwei geneigten Platten bewegt sich nach den weiteren Theilen hin; denn der engere Meniskus ist converer als der weitere, übt daher einen größeren Druck als dieser aus.

f. Leichte oder an Fäden hängende Gegenstände bewegen sich auch hier zu einander; wird aber ein Gegenstand benetzt und der andere nicht, so gehen sie aus einander.

g. Fließt die Flüssigkeit unter noch so spitzem Winkel aus einem Gefäße, so rinnt sie doch nie an der Wand herab.

173 **Die Diffusion der Flüssigkeiten.** Wenn zwei mischbare Flüssigkeiten wie Wasser und Weingeist oder Wasser und wässerige Salzlösungen mit einander in Berührung stehen, so breitet sich die eine nach und nach in die andere aus, sie diffundiren in einander. Die unmittelbar sich berührenden Schichten enthalten nach einer gewissen Zeit, etwa nach einem Tage, am meisten von der anderen Flüssigkeit, die entfernteren immer weniger (Berthollet 1803). Die Zeit, nach welcher von der einen Flüssigkeit ein bestimmter Betrag in die andere mit demselben abnehmenden Schichtengehalt eindringt, ist nach Graham (1850) bei verschiedenen Flüssigkeiten sehr verschieden.

So diffundirt nach Graham Kochsalzlösung 2,33 mal langsamer in Wasser als Salzsäure; Bittersalz- und Zuckerlösung 7, Eiweiß 49, Caramel 99 mal langsamer als Salzsäure. Ueberhaupt ist die Diffusionsgeschwindigkeit der Kolloide viel geringer als die der Krystalloide. Hierdurch läßt sich eine Mischung von Kolloiden und Krystalloiden leicht von einander trennen; noch schärfer geschieht dies, wenn man die Mischung durch eine Kolloidhaut z. B. vegetabilisches Pergament (in Schwefelsäure getauchtes Papier) von einer Wasserschicht scheidet; in diese dringen dann die Krystalloide ein, während die Kolloide zurückbleiben; Graham nennt diese Scheidung Dialyse.

Da die Diffusionsgeschwindigkeit ein unbestimmter Begriff ist, so führte Fick (1855) die Diffusionsconstante ein, d. i. diejenige Menge des gelösten Körpers, welche in 1 Tage durch 1 qcm geht, wenn der Concentrationsunterschied in einem Gefäße von 1cm Höhe 1g beträgt; für Kochsalz ergab sich 0,888 und zwar bei 16°; sie wächst nämlich ziemlich stark mit der Temperatur. In neuester Zeit hat man, um Uebereinstimmung mit dem absoluten Maße (460.) herzustellen, die Zeit auf eine Secunde reducirt, und deutet dies und das Quadratcentimeter durch das Zeichen cm^2/sec an; dann wäre die Diffusionsconstante $D = 0{,}0000103\ cm^2/sec$; um die vielen Nulle zu vermeiden, die besonders in Tabellen störend sind, schreibt man $D = 103 \cdot 10^{-7}\ cm^2/sec$. Berechnet man hiernach Grahams Angaben, so ergibt sich für 5° $D = 88$ und für 9° $D = 105$; Johannisjanz (1877) dagegen fand $D = 53$ und Schuhmeister (1879) für 10° $D = 97 \cdot 10^{-7}\ cm^2/sec$. Auch über die Veränderung mit der Temp. sind die Angaben verschieden. Diese Widersprüche brachten Wroblewsky (1881) zu der Vermuthung, daß die Grundlagen ungiltig seien. Bei seiner Definition setzte Fick voraus, daß die Diffusion der Dichte proportional stattfinde, daß also die Abnahme der Concentration in den entfernteren Schichten regelmäßig sei, sich graphisch durch eine gerade Linie darstellen lasse. H. F. Weber aber schloß (1879) aus seinen Versuchen, daß die Diffusionsconstante mit steigender Concentration sehr langsam abnehme, während Schuhmeister das Gegentheil, allerdings bei anderen Stoffen wahrnahm; nach Beiden muß das „Fick'sche Elementargesetz" corrigirt werden. Für Kochsalz fand Wroblewski $D = 768 \cdot 10^{-8}\ cm^2/sec$ bei einer $^2/_3$ procentigen Lösung, bei einer 6 procentigen 808 und bei einer 18 procentigen 889; für Spuren von Lösung ergab sich sogar nur 810 bis 860 . 10^{-8} cm^2/sec. Beim Kochsalz nimmt also D mit der Concentration ab und zu. Indessen hält sich W. nach seinen Versuchen für berechtigt, der Diffusionsconstante die Existenz abzusprechen, indem D bei einer und derselben Temperatur zwischen zwei weit voneinander entfernten Grenzwerthen variiren kann und daher auch mit der Dauer des Versuches sich ändert.

Die Erklärung der Diffusion geschieht durch die molekulare Bewegung; in den Flüssigkeiten ist immer ein Theil der Moleküle in fortschreitender Bewegung; kann also in die molekularen Zwischenräume der berührenden Flüssigkeit eindringen, bei höherer Temperatur gerathen mehr Moleküle in diese Bewegung, weßhalb die Diffusion mit der Temp. zunimmt. Auffällig stimmt damit ein Versuch von Roberts (1883), der auf geschmolzenes Blei ge-

schmolzenes Gold goß und schon nach 40 Minuten ein völlig gleichmäßiges Gemisch beider Metalle erhielt. Ja sogar fein gepulverte Kohle diffundirt bei längerer Erhitzung in und durch die Wände eines Porzellantiegels (Marsden 1881), sowie nach Colson (1882) Kohle in Eisen und Eisen in Kohle, letzteres aber nur bei nicht zu hoher, ersteres nur in hoher Temperatur. In Platin findet das Eindringen von Kohle nicht statt, wie Oel in Wasser nicht diffundirt; zur Diffusion ist also eine gewisse, noch unerklärte Verwandtschaft, der Löslichkeit ähnlich, nothwendig.

174 **Die Endosmose** (Parrot 1811, Fischer 1812). Wenn zwei Flüssigkeiten durch eine Scheidewand getrennt sind, die viele Haarröhrchen oder auch viele Poren enthält, welche mit einander Haarröhrchen bilden, so müssen diese Haarröhrchen von beiden Flüssigkeiten eine gewisse, im Allgemeinen verschiedene Menge einsaugen, welche Mengen sich durch Diffusion mit einander vermischen. Diese Mischung steht nun mit beiden Flüssigkeiten in Berührung und muß daher in beide diffundiren, und zwar mit verschiedener Geschwindigkeit, also nach einer gewissen Zeit in verschiedener Menge. Durch eine capillare Scheidewand zweier Flüssigkeiten gehen also verschiedene Mengen derselben. Man nennt diese Eigenthümlichkeit solcher Scheidewände die Endosmose (ἔνδον hinein und ὠσμός, Stoß). Am besten zeigen diese Erscheinungen thierische Häute (Blase, Herzbeutel, Hornhaut) und Pflanzenmembranen, welche Häute indeß gegen gleiche Flüssigkeiten ein verschiedenes Verhalten zeigen. Trennt man z. B. Wasser und Weingeist durch Blase, so vermehrt sich der Weingeist, trennt man sie durch Kautschuk, so steigt das Wasser; aber in beiden Fällen findet sich nach dem Versuche beiderseits eine Mischung beider Flüssigkeiten.

Zur Untersuchung der durchgehenden Mengen construirte Dutrochet (1826) sein Endosmometer, eine getheilte, unten trichterförmig sich erweiternde Röhre, die unten mit einer Membran geschlossen ist. In dieselbe wird die eine Flüssigkeit, z. B. Kupfervitriollösung gefüllt, und dann wird das untere Ende in die andere Flüssigkeit getaucht. Bald steigt die Flüssigkeit in der Röhre, während an der blauen Farbe des Wassers erkannt wird, daß auch Vitriollösung nach unten gegangen ist. Solche Untersuchungen ergaben, daß die durchgehenden Wassermengen der Dichte der anderen Flüssigkeit proportional sind. Doch ist Dutrochets Methode ungenau, da z. B. bei gleich starker Endosmose beider Flüssigkeiten kein Steigen bemerkt werden kann. Genauer sind Jollys Untersuchungen (1849), der eine gewogene Menge des zu untersuchenden Körpers in sein Endosmometer füllte und dieses so lange in frisches Wasser tauchte, bis der Körper ganz verschwunden und durch Wasser ersetzt war. Die für 1g des geprüften Körpers eintretende Wassermenge nannte Jolly das endosmotische Aequivalent. Bei Benutzung von Schweinsblase fand er dasselbe für Alkohol und Kochsalz = 4, Zucker = 7, für Glaubersalz, Kaliumsulfat und Bittersalz = 12, für Kali = 230. Da indessen die durchgehende Wassermenge von der Dichte der anderen Flüssigkeit abhängt, und da diese bei Jollys Methode immer geringer wird, so hat Eckhard (1868) in das Endosmometer eine größere Menge des zu prüfenden Körpers zusammen mit einer gesättigten Lösung desselben Körpers gebracht, dasselbe in immer frisches Wasser getaucht und endlich gemessen, welche Wassermenge für die ausgetretene Stoffmenge eingetreten war, und zwar zu einer Zeit, wo das Endosmometer noch ungelösten Stoff enthielt. Nach dieser Methode konnte Eckhard auch den Begriff des endosmotischen Aequivalentes schärfer präcisiren. Es ist diejenige Gewichtsmenge Wasser in Grammen, welche für 1g eines löslichen Körpers durch eine capillare Scheidewand ausgetauscht wird, vorausgesetzt, daß während des Vorganges die Flüssigkeiten zu beiden Seiten der Scheidewand ihre Beschaffenheit unverändert beibehalten. Dieses endosmotische Aequivalent ist nach Eckhard unabhängig von der Temperatur und dem Drucke der Flüssigkeiten, sowie von der Richtung der Diffusion, dagegen abhängig von der materiellen Beschaffenheit der Membran und der Flüssigkeiten, und, wie Dutrochet zeigte, im Allgemeinen mit der Dichte oder Concentration der Lösung zunehmend; die Geschwindigkeit der Endosmose erschien zwar ebenfalls unabhängig von der Richtung der Diffusion, aber wachsend mit der Temperatur. — Dutrochet gebrauchte anfänglich den Ausdruck Endosmose für die stärker strömende Flüssigkeit, und für die schwächer strömende die Bezeichnung Exosmose; diese Bezeichnungen, sowie auch Diosmose oder kurzweg Osmose für die ganze Erscheinung gehen allmälig in den Ausdruck „Diffusion durch Scheidewände“ über.

Die Endosmose erklärt das Eindringen des Regens in Früchte (z. B. Traubenbeeren) und Blätter und daher die rasch erfrischende Wirkung desselben; das Ansaugen des Pflanzensaftes durch die Wurzelspitzen und daher durch die Fortdauer dieses Ansaugens das Steigen des Saftes in den Gefäßen der Pflanzen; die Aufsaugung des Milchsaftes oder Chylus

mittels der Milchsaftgefäße aus dem Dünndarme und die Bereitung aller Ernährungsflüssigkeiten, wie der Lymphe, der Galle, des Speichels u. s. w. aus dem Blute. Wibel hat (1883) die Osmose strömender Flüssigkeiten untersucht und gefunden, daß dieselbe durch organische Häute stärker ist als die ruhende, durch unorganische aber schwächer; erstere Thatsache macht die Bedeutung der Osmose für die Thier- und Pflanzenwelt noch deutlicher, letztere macht es unmöglich, daß der Kanalinhalt der Siele durch die Wände in das Erdreich dringe, wenn derselbe nur schnell genug fließt.

4. Bewegungen der Flüssigkeiten.

175 **Ausfluß aus Gefäßen.** Wenn eine Flüssigkeit aus einer Boden- oder Seitenöffnung eines Gefäßes fließt, so bieten sich hauptsächlich drei Fragen zur Untersuchung dar: die Geschwindigkeit des Ausflusses aus der Oeffnung, die Ausflußmenge in einer gewissen Zeit und die Eigenschaften des Ausflußstrahles.

1. Die Ausflußgeschwindigkeit; Torricellis Theorem (1644): Die Geschwindigkeit des Ausflusses an der Oeffnung ist gleich der Geschwindigkeit eines Körpers, der frei und senkrecht die Höhe von dem Wasserspiegel bis zur Oeffnung herabgefallen ist. Dieses schon von Torricelli durch Beobachtung gefundene, aber nicht bewiesene Gesetz läßt sich auf folgende Art beweisen: Es sei h' die Höhe einer unendlich dünnen Wasserschicht direct über der Oeffnung q, und g' die uns noch unbekannte Beschleunigung, welche diese Schicht durch die auf sie einwirkende Kraft k erfährt; dann ist nach Formel (4) (s. 127. 7) die Fallgeschwindigkeit dieser Schicht $v = \sqrt{(2g'h')}$. Die Kraft k, welche die Acceleration g' erzeugt, ist aber der auf die Schicht ausgeübte Druck, welcher durch qhp gemessen wird, wenn h die ganze Höhe des Wassers über der Oeffnung q, die sogenannte Druckhöhe bedeutet, und wenn p das Gewicht der Cubikeinheit Wasser ist; die durch diese Kraft k niedergedrückte Wassermasse der genannten Schicht ist nach Formel (6) (s. 19.) $m = qh'p/g$, worin g die bekannte Acceleration der Erdschwere bezeichnet. Wenn man aber eine bewegende Kraft und die durch dieselbe bewegte Masse kennt, so kann man nach Fl. (8) (s. 24.) die erzeugte Acceleration finden; dieselbe ist $g' = k/m = qhp/(qh'p/g) = g.(h/h')$. Setzen wir diesen Werth für g' in den für v ein, so ergibt sich leicht $v = \sqrt{(2gh)}$, womit Torricellis Gesetz bewiesen ist.

Dasselbe gilt nur dann, wenn die drückende Kraft dieselbe bleibt, wenn also der Wasserspiegel seine Höhe nicht ändert; dies ist annähernd der Fall, wenn das Gefäß sehr groß und die Ausflußöffnung sehr klein ist. Mit einem solchen Gefäße oder auch mit einer Mariotte'schen Flasche (s. 201.) oder auch mit dem Ausflußgefäße Fig. 96, S. 165, das durch Zugießen immer gefüllt bleibt, läßt sich denn auch die Richtigkeit des Gesetzes nachweisen. Man vergleiche nämlich die aus mehreren gleichen Oeffnungen in verschiedener Höhe des Gefäßes, aber in gleicher Zeit geflossenen Wassermengen, oder auch die aus einer Oeffnung bei verschiedenem Wasserstande geflossenen Quantitäten, so wird man finden, daß dieselben sich direct verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Druckhöhen. Da aber die Ausflußmengen für gleiche Zeiten und gleiche Oeffnungen den Geschwindigkeiten proportional sind, so müssen die Geschwindigkeiten sich ebenfalls wie die Wurzeln aus den Druckhöhen verhalten, was dem Theorem von Torricelli gemäß ist. Dieses Theorem lehrt nebenbei, daß die Ausflußgeschwindigkeit nicht von der Natur der Flüssigkeit und nicht von der Form der Oeffnung abhängt. Auch folgt aus demselben, daß ein Wasserstrahl, der aus einer nach oben gerichteten Oeffnung eines Seitenarmes eines Gefäßes springt, theoretisch betrachtet bis zu der Höhe des Wasserspiegels steigen muß; denn ein steigender Körper erreicht nach 130. dieselbe Höhe, welche er durchfallen muß, um die Steiggeschwindigkeit zu erreichen. In Wirklichkeit steigt ein Springbrunnen nicht so hoch, als das Wasser in dem Speisereservoir steht, weil ein Theil der Steigkraft durch die Reibung, den Widerstand der Luft und die zurückfallenden Wassermassen verzehrt wird; um wenigstens den letzten Einfluß zu vermindern, läßt man Springbrunnen etwas schief aufsteigen, was schon bei einer schief geschnittenen Ausflußöffnung stattfindet (Adhäsion). — Ueberhaupt haben Ausflußöffnungen und Röhrenwände starke Einwirkungen auf die Ausflußerscheinungen; so fanden Hagen (1839) und Poiseuille (1843), daß die Ausflußgeschwindigkeiten aus capillaren Ansatzröhren sich wie die Druckhöhen selbst, und nicht wie die Wurzeln aus denselben verhalten, eine

merkwürdige Abweichung von Torricellis Theorem. Hagen (1869) und O. E. Meyer (1873) zeigten, daß Poiseuilles Gesetz auch für Röhren von großem Durchmesser gilt, wenn dieselben nur hinreichend lang sind.

Man erklärt dies durch die innere Reibung der Flüssigkeiten. Wenn eine Flüssigkeit z. B. in einer Röhre fließt, deren Innenwand von der Flüssigkeit vollkommen benetzt wird, so reibt sich dieselbe nicht an der Röhrenwand, sondern an der anhaftenden Flüssigkeitshaut derselben, und zwar ist es die äußerste Schicht, welche sich an dieser Haut reibt; ebenso reibt sich an der äußersten eine weiter nach innen liegende u. s. w., so daß in der Achse die größte Geschw. herrscht; dieser Vorgang heißt innere Reibung. Schon Newton hatte auf diese Weise die Zähigkeit oder Viscosität der Flüssigkeiten erklärt und das Gesetz ausgesprochen, daß zwei Schichten einer solchen eine Reibung gegeneinander ausüben, die ihrem Abstande d umgekehrt proportional sei, dagegen direct proportional ihrer Berührungsfläche s, ihrer relativen Geschw. u und einem Coëfficienten η der inneren Reibung, der das Maß der Zähigkeit sei; demnach kann die innere Reibung ausgedrückt werden durch die Fl. $\eta su/d$. Hieraus läßt sich das Gesetz von Poiseuille in folgender Fl. ableiten $v = \pi r^4 (p_a - p_e) / 8\eta l$, worin v die Ausflußgeschw. am Fuße einer Capillarröhre, r den Radius und l die Länge derselben, p_a und p_e den Druck am Anfang und am Ende der Röhre bedeuten. Röntgen hat (1883) einen Apparat construirt, mit welchem alle Theile des Gesetzes experimentell nachgewiesen werden können (Wied. Ann. 20. S. 268). Aus dieser Fl. läßt sich umgekehrt der Coëff. η berechnen, wenn die andern Größen durch Versuche festgestellt sind; O. E. Meyer (1862) bestimmte η durch den Widerstand, den eine in der Flüssigkeit schwingende Kreisscheibe erfährt, welche Methode auch Grotrian (1875) benutzte; für sehr zähe Flüssigkeiten kann auch das langsame Fallen von Kugeln durch die Flüssigkeit dienen (Schöttner 1879). Der nach solchen Methoden gefundene Coëff. der inneren Reibung bedeutet, wie aus der ersten obigen Fl. hervorgeht die Kraft, welche auf eine Fläche von 1 qcm wirkend die Geschw. zweier um 1 cm voneinander abstehenden Schichten in 1 Sec. um 1 cm vermindert. Nach dem absoluten Maßsystem (460.) ausgedrückt ist bei 10° der Coëff. der inneren Reibung des Wassers $\eta = 0{,}013$ Gramm-Centimeter-Secunde. Die Zähigkeit einer Flüssigkeit ist in hohem Maße von der Temperatur abhängig; so ist für Wasser von 20° der Coëff. $\eta = 0{,}010$, für Wasser von 30° nur $= 0{,}008$. Merkwürdigerweise ist er für Alkohol größer als für Wasser, so $= 0{,}015$ für 10°; sonst ist er für zähe Flüssigkeiten groß z. B. für Glycerin von 20° gleich 9, für Glycerin von 3° gleich 40 (Schöttner 1878), und besonders groß für feste Körper, die unter höherem Drucke sich zähflüssig verhalten, z. B. für Schwarzpech = 4000 Million, für Storax = 134000 Million (Obermayer 1877). Zahlreiche Untersuchungen über diese Reibungsconstante wurden in den letzten Jahren angestellt, außer den Genannten von Sprung (1876), Wijkander (1878), Pribram u. Handl (1879), Obermayer (1879). Eine zuerst vermuthete Abhängigkeit von der chemischen Constitution stellte sich nicht als eine gesetzmäßige heraus. Die Temperatur hat im Allgemeinen den Erfolg, bei ihrem Steigen die Zähigkeit in hohem Grade zu vermindern. Während die Reibungsconstante des Wassers bei 50° fast 3 mal kleiner ist als bei 0° (Sprung) und die von Glycerin bei 25° sogar 6 mal kleiner als bei 3°, ist für Quecksilber der Unterschied viel geringer; nach Koch (1881) ist sie bei −18° nur doppelt so groß als bei +300; bei 10° ist sie $\eta_{10} = 0{,}01633$, was mit Warburg (1870) sehr nahe stimmt. Einen großen Einfluß hat die Concentration von Salz- und Säurelösungen. Bei Säurelösungen steigt der Coëff. mit der Concentration bis zu einem gewissen Betrage und nimmt dann wieder ab, und dieser Wendepunkt verschiebt sich mit der Temperatur; noch stärker tritt dies bei vielen Salzlösungen hervor, während andere Salzlösungen bei allen Temperaturen größere Zähigkeit als Wasser haben. Diese Untersuchungen können von Bedeutung werden, wenn sich solche Beziehungen als sicher herausstellen, wie die von Grotrian vermuthete, daß der reciproke Reibungscoëfficient, also die Fluidität sich ebenso mit der Temperatur ändert, wie das galvanische Leitungsvermögen. Großmann hat (1883) diese Vermuthung als ein Naturgesetz nachgewiesen, dem er folgende Fassung gibt: das Product innerer Reibung und galvanischer Leitung der Flüssigkeiten ist constant in Bezug auf die Temperatur. Obermayer (1880) erkannte, daß die Zähigkeit der Flüssigkeiten in der Nähe der Oberfläche allmälig zunimmt und daß bei Wasser und wässerigen Lösungen in der Oberfläche selbst die Zähigkeit plötzlich noch sehr stark wächst, während bei Alkohol, alkoholischen Lösungen, Schwefelkohlenstoff statt dieser letzteren plötzlichen Zunahme eine plötzliche Abnahme stattfindet; auch Plateau hatte schon 1869 innere und Oberflächenzähigkeit unterschieden.

176 2. Die Ausflußmenge. Die in einer Secunde ausfließende Wassermenge hat ein Volumen gleich dem Product der Ausflußöffnung mit der Ausflußgeschwindigkeit. Denn in 1 Sec. fließt eine Wassersäule aus, deren Grundfläche gleich der Oeffnung ist, und deren Höhe dem

Wege gleich kommt, den das zuerst ausfließende Wassertheilchen in 1 Sec. zurücklegt, welcher Weg bekanntlich durch die Geschwindigkeit gegeben ist; es ist also die Ausflußmenge in t Sec. $= t \cdot q \cdot \sqrt{(2gh)}$.

Indessen zeigen die einfachsten Versuche, daß in den meisten Fällen die wirkliche Ausflußmenge dieser berechneten oder theoretischen nicht gleich, sondern meistens kleiner als dieselbe ist; der Grund dieser Erscheinung liegt in der Zusammenziehung oder Contraction des ausfließenden Strahles. Da nämlich die rings über der Oeffnung seitlich gelegenen Theilchen nach der Oeffnung hinströmen müssen, so haben sie nicht blos die Richtung senkrecht zur Fläche der Oeffnung, sondern auch eine Bewegung nach dem Mittelpunkte derselben; folglich ist die Oberfläche des Ausflußstrahles nicht senkrecht auf der Oeffnung, sondern schief zusammenlaufend; der Strahl zieht sich sofort bei seinem Austritte zusammen, sein Volumen ist nicht das einer Säule, wie bei der Rechnung angenommen wurde, sondern kleiner. Es muß demnach die theoretische Ausflußmenge mit einem ächten Bruche multiplicirt werden, wenn sie der wirklichen gleich kommen soll; man nennt diesen ächten Bruch den Contractionscoëfficient; derselbe beträgt für eine Oeffnung in einer dünnen Wand etwa 0,6, ändert sich aber etwas nach Form und Größe der Oeffnung und mit dem Drucke; für eine Oeffnung in einer dicken Wand oder für eine gleich weite Ansatzröhre ist er = 0,8, für eine conisch sich verengernde Röhre 0,95, für eine wie der Strahl geformte Ansatzröhre = 1 und für eine sich conisch schwach erweiternde Ansatzröhre sogar größer als 1. Die Vergrößerung des Coëfficienten rührt von der Adhäsion der Oeffnungswände gegen die Flüssigkeit her; im letzten der angeführten Falle reißt der Ausflußstrahl Luft ringsum mit fort, wodurch der Luftdruck auf die Flüssigkeit im Gefäße wirksam wird und die Geschwindigkeit des Ausflusses vergrößert.

Tresca in Paris hat (seit 1864) auch feste Körper, wie Blei, Zinn, Silber, Eisen, Stahl, dann pulverige Körper, wie Sand, weiche plastische Körper, wie Thon, spröde Körper, wie Eis, mittels einer hydraulischen Presse sehr großen Druckkräften (bis zu 100 000kg) ausgesetzt und gefunden, daß dieselben alsdann ausfließen wie flüssige Körper; insbesondere zeigt die innere Bildung des Strahles die Eigenthümlichkeit, daß die ursprünglich horizontalen Trennungsflächen der einzelnen Schichten sich bald nach unten krümmen und zu verticalen Ringflächen werden, in denen sich die einzelnen Cylinderringe des Strahles einander berühren, wodurch obige Erklärung der Contraction bestätigt wird; auch zur Erklärung der Gletscherbewegung tragen Trescas Versuche bei. Endlich zeigen dieselben, daß auch feste Körper einen Druck überall hin fortpflanzen, wenn derselbe nur bedeutend genug ist. Es gibt jedoch auch Körper, welche unter einem Drucke nicht nachgeben, sondern denselben entweder unverändert tragen oder zerquetscht werden, wie Talg und Thonplatten (Obermayer 1877).

177 3. Der Ausflußstrahl. Die Linie, welche der Strahl beschreibt, ist eine gerade, wenn der Ausfluß durch eine Bodenöffnung stattfindet; sie ist eine Parabel, wenn ein seitlicher Ausfluß oder Abfluß stattfindet, und diese Parabel ist um so flacher, je größer die Druckhöhe (h) ist.

Beweis. Nach den bekannten Bezeichnungen ist $y = vt$, $x = \frac{1}{2} gt^2$ und $v = \sqrt{(2gh)}$, woraus $y^2 = 2gh \cdot t^2 = 2gh\,(2x/g)$ oder $y^2 = 4hx$, die Gl. einer Parabel, deren Parameter $= 2h$ ist. Die Parabel des ausfließenden Wasserstrahles ist um so flacher, je größer die Druckhöhe h ist, weil dann einem und demselben x ein größeres y zugehört. Da indessen tiefere Oeffnungen zwar ein größeres h, aber ein kleineres x haben, so können doch 2 verschiedene Ausflußstrahlen denselben Punkt des Bodens treffen, auf welchem das Ausflußgefäß steht; dies ist der Fall, wenn sie für den Boden dasselbe hx haben, wenn also das h des einen gleich dem x des andern ist. Befindet sich an einem Ausflußgefäße von etwa 1m Höhe die eine Oeffnung 20cm vom Spiegel, die andere 20cm vom Boden entfernt, so treffen die beiden Strahlen denselben Punkt des Bodens, während ein Zwischenstrahl eine größere Sprungweite hat (Krebs 1880).

Hinsichtlich der Constitution des Ausflußstrahles sind das Gefüge und die Formwechsel desselben zu beachten. In Betreff des Gefüges unterscheidet man den continuirlichen Stamm, in welchem die Flüssigkeit noch vollkommen klar ist, und zwar deßhalb, weil durch kein Mittel eine Trennung in einzelne Theilchen wahrgenommen werden kann, sodann den unklaren Theil, welcher uns zwar noch zusammenhängend erscheint, in welchem aber durch optische und akustische Versuche (Magnus 1859) eine Auflösung in Tropfen nachgewiesen werden kann, und welcher eben wegen dieser Auflösung, wie die Optik zeigt, unklar erscheinen muß, und endlich den in Tropfen aufgelösten Theil, das natürliche Tropfenwerfen, in welchem die Tropfen mit wachsendem Abstande von der Ausflußöffnung sich immer weiter von einander entfernen. Die letztere Erscheinung ist eine Folge des freien Falles, da die vorausgehenden Theile des aufgelösten Strahles wegen ihres längeren Fallens eine größere Geschwindigkeit besitzen und sich daher von den folgenden immer weiter entfernen; zwei um

eine Secunde von einander entfernte Tropfen haben nach 1 Secunde Fallzeit des zweiten Tropfens einen Abstand von 15^m, nach 10 Sec. von 105^m. Man hat auch häufig die unsichtbare Auflösung im zweiten Theile der Fallwirkung zugeschrieben; allein einerseits wäre es denkbar, daß diese Wirkung sich in einer fortwährenden Abnahme der Strahldicke äußern könnte; dann hat Plateau (1856) gezeigt, daß ein Oelcylinder in der bekannten Mischung nur so lange seine Gestalt behält, als seine Höhe nicht viel mehr als das Dreifache seines Durchmessers beträgt, daß er aber bei weiterer Verlängerung zuerst Einschnürungen und Anschwellungen annimmt und sich endlich in Tropfen auflöst, daß also auch ohne Fallwirkung die Tropfenauflösung stattfindet; endlich hat Abendroth (1874) auch bei steigenden Strahlen dieselben drei Theile wahrgenommen, die an fallenden zu beobachten sind, und an dem unklaren Theile die Auflösung in Tropfen durch optische Mittel nachgewiesen. Diese kann hier ebenso wenig, wie das Tropfenwerfen, das in Gestalt von parabolischen Perlenregen auftritt, dem Fallen zugeschrieben werden. Fuchs hat schon (1856) die Adhäsion des ausfließenden Strahles durch den Rand der Oeffnung als die Ursache dieses Perlenregens erkannt. Die Auflösung im unklaren Theile wird hier von den Schwingungen hergeleitet, welche in den Wassertheilchen durch die Reibung der Strahlenoberfläche an der Ausflußröhre, sowie durch die Reibung der inneren, schneller bewegten Strahlentheile an den äußeren stattfinden müssen; unterstützt wird diese Erklärung dadurch, daß durch das Aufsetzen einer tönenden Stimmgabel auf das Gefäß die Auflösung befördert, der continuirliche Stamm verkürzt wird. Diese Schwingungen bringen schon in diesem Stamme feine Einschnürungen hervor, welche nach obigem Plateau'schen Versuche mittels der Oberflächenspannung die Auflösung in Tropfen veranlassen. Bei den fallenden Strahlen werden die Schwingungen durch die seitlichen, die contractio venae bewirkenden Bewegungen noch verstärkt, und beim Ausflusse aus einer dünnen Wand zur höchsten Stärke dadurch ausgebildet, daß eine solche wegen ihrer Elasticität in starke Schwingungen versetzt werden kann. Darum treten hier außer den die Tropfenbildung bewirkenden feineren Einschnürungen und Anschwellungen noch größere Erscheinungen derselben Art auf, die zu den Formwechseln des Strahles gehören.

Die **Formwechsel** bestehen zunächst in den Knoten und Bäuchen, abwechselnden Verdünnungen und Verdickungen des Strahles, sowohl im unklaren, wie im aufgelösten Theile. An den Knoten sind nach Savart (1833), der diese Erscheinungen zuerst studirte, und nach Magnus die Tropfen länger als dick, ellipsoidisch, an den Bäuchen dicker als lang, sphäroidisch, während nach jedem größeren Tropfen ein kleinerer Trabant, von der inneren schnelleren Ader herrührend, zu beobachten ist. Daß die Knoten und Bäuche von den Schwingungen des Randes herrühren, zeigt die Thatsache des Verschwindens jener Formwechsel, wenn man die Schwingungen beseitigt, und das verstärkte Auftreten derselben, wenn die Schwingungen z. B. durch das Anstreichen eines Violoncells verstärkt werden. An ursprünglich cylindrischen Strahlen, die aus einer kreisförmigen Oeffnung fließen, zeigen sich nur diese Formwechsel; hat aber der Strahl einen anderen als kreisförmigen Querschnitt, einen länglich elliptischen oder kantigen, so ist die Oberflächenspannung an den convexeren Stellen stärker, muß daher diesen Theil des Querschnitts nach innen, und durch diesen Druck die weniger convexen, ebenen oder concaven Stellen nach außen treiben, wodurch dieselben mehr convex und die ersteren weniger convex werden, und der Querschnitt in einiger Entfernung in der Stellung geradezu vermechselt erscheint. Die Kanten und Rippen eines Strahles ziehen sich nach innen, während neue Rippen an vorher zurückgezogenen Stellen hervortreten; hierdurch macht der Strahl den Eindruck spiraliger Rotation und bewirkt mit den Knoten und Bäuchen zusammen ein lebhaftes Spiel abwechselnd bewegter Formen.

Sehr mannichfaltige Abflußformen entstehen, wenn Strahlen gegen feste Körper treffen; die Adhäsion verhindert alsdann das Zurückwerfen nach den Regeln der Elasticität und die flüssige Masse hängt durch ihre Cohäsion zusammen. Durch das Zusammenwirken der Adhäsion, Cohäsion und der lebendigen Kraft des Strahles entstehen je nach dem Vorwiegen einer dieser Kräfte allerlei schildförmige und zeltförmige Abflußfiguren, die in Gärten als Schmuck verwendet werden. Aehnliche Figuren bilden sich bei dem Zusammentreffen zweier Strahlen (Savart und Magnus, v. d. Mensbrugghe 175.).

Das Fließen des Wassers in Röhren und Kanälen. In Röhren und Kanälen bewegt sich das Wasser nur fort, wenn nach einer Richtung ein überwiegender Druck ausgeübt wird; sind solche Räume wagrecht oder ansteigend, so muß ein äußerer Druck auf das Wasser in denselben einwirken, wie z. B. der Druck einer Kraftmaschine oder der Druck einer Wassersäule, die mit der zu bewegenden Wassermasse in Verbindung steht. Dagegen in abwärts geneigten Räumen wird der Druck durch das Gewicht des Wassers selbst erzeugt; demnach wird in diesem Falle die Geschwindigkeit des herabfließenden Wassers berechnet, wie die= 178

jenige eines auf schiefer Ebene herabgefallenen Körpers. Abgesehen von den Hindernissen, ist daher die Geschwindigkeit, mit welcher Wasser am Fuße einer geneigten Fläche abfließt, gleich der Geschwindigkeit eines Körpers, der die gleiche Höhe, welche das Wasser schief durchfällt, senkrecht herabgefallen ist, also $v = \sqrt{2gh}$, wenn h diese senkrechte Höhe bedeutet.

Hiernach wäre die Geschwindigkeit des fließenden Wassers unabhängig von der Neigung der schiefen Fläche, auf welcher dasselbe herabfließt; dieses Resultat ist aber nur richtig, wenn die Hindernisse der Bewegung außer Acht gelassen werden. Indessen darf dies hier gerade am wenigsten geschehen, weil die Hindernisse sehr bedeutend sind. Das Haupthinderniß ist die äußere und innere Reibung des Wassers; dieselbe ist offenbar um so größer, je länger das Bett ist, auf welchem das Wasser herabfließen muß, um die Höhe h zu durchfallen, je geringer also die Neigung der schiefen Ebene, oder wie man sich hier ausdrückt, das Gefälle ist. Man mißt das Gefälle durch den Sinus des Neigungswinkels oder durch einen Bruch, welcher angibt, um wie viel das Wasser fällt, wenn es um eine Längeneinheit fortfließt; so beträgt z. B. das Gefälle der Moldau zwischen Budweis und Prag 0,001, das des Mississippi im Mittel nur 0,0001 (relatives Gefälle). Auch mißt man das Gefälle durch die Strecke, welche das Wasser senkrecht durchfällt, wenn es um 1 Meile fortfließt; so beträgt das Gefälle des Rheines zwischen Mannheim und Mainz nur 1^m auf die Meile, während es zwischen Laufenburg und Basel 16^m beträgt (absolutes Gefälle). Je geringer das Gefälle ist, desto länger ist nicht blos die Fläche, auf welcher sich das Wasser reibt, sondern desto größer ist auch der Wasserdruck, von dem ja bekanntlich die Größe der Reibung abhängt. Außerdem ist die innere Reibung (175.) ein verwickelter Vorgang; durch all dies ist der Einfluß der Reibung ein so complicirter, daß es noch nicht gelungen ist, denselben durch Rechnung aufzufinden. Man hat diesen Mangel durch zahlreiche Versuche zu ersetzen gesucht und gefunden, daß die Reibung nicht allein von der Länge, sondern auch von der Breite und Tiefe des Bettes abhängt und mit dem Quadrat der Geschwindigkeit selbst zunimmt.

Durch alle diese Einflüsse können die Hindernisse so groß werden, daß, insbesondere bei kleinem Gefälle, die Geschwindigkeit durch das Fallen nicht mehr zunimmt, sondern daß jede neue Fallgeschwindigkeit durch die Hindernisse aufgezehrt wird. Es findet dies besonders bei Flüssen statt, wo die letzteren noch durch Unebenheiten und Richtungsänderungen des Bettes vergrößert werden. Die mittlere Geschwindigkeit hängt dann nicht mehr von der Druckhöhe h, sondern hauptsächlich vom Gefälle ab; so ist sie im Rheine zwischen Mannheim und Mainz etwa 1^m, bei Basel 3^m, wenn das Wasser die mittlere Höhe erreicht hat. Die Geschwindigkeit ändert sich dann nur bei Querschnittänderungen und bei Aenderungen des Wasserstandes: wird das Bett enger und flacher, und wird der Wasserstand höher, so wächst die Geschwindigkeit und die Oberfläche wird schiefer; so ist bei Basel bei Hochwasser die Geschwindigkeit 4^m, im Mississippi aber nur 2^m. Wird das Bett weiter und tiefer oder der Wasserstand niedriger, so wird die Oberfläche wagrechter und die Geschwindigkeit kleiner; so ist bei Basel die Geschwindigkeit des tiefsten Wasserstandes nur 2^m.

Für Kanäle und Röhren, in denen das Wasser eine bestimmte Fallhöhe h durchläuft, hat man (insbesondere Weisbach) Formeln aufgestellt, welche angeben, um wie viel die Druckhöhe h durch die Reibung vermindert wird, man hat also die Reibung in Druckhöhe dargestellt. Ebenso hat man in Druckhöhe durch Formeln denjenigen Verlust ausgedrückt, der von plötzlichen Richtungsänderungen an Knieen, von allmäligen Richtungsänderungen an Krümmungen, von Einschnürungen, Erweiterungen und Formänderungen der Kanäle und Röhren herrührt, von welchen

Einflüssen besonders die beiden ersten bedeutende Hindernisse des Fließens bilden und nach vielfachen Versuchen ebenfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und mit dem Ablenkungswinkel wachsen. Zählt man alle diese in Druckhöhen ausgedrückten Hindernisse von der ursprünglichen Druckhöhe ab, so kann man durch den Rest h_1 mittels der Formel $v = \sqrt{(2gh_1)}$ die Geschwindigkeit des am Fuße dieser Höhe abfließenden Wassers finden.

Indessen werden solche Rechnungen nur für noch nicht ausgeführte Entwürfe angestellt. Für wirklich bestehende Wasserläufe, besonders für Kanäle, Flüsse und Bäche, sucht man die Geschw. practisch zu ermitteln. Man weiß aus Versuchen mit Schwimmstäben, daß ebenso, wie in Röhren die größte Geschw. in der Achse herrscht, in regelmäßigen Kanälen die größte Geschw. unter der Mitte der Oberfläche stattfindet. Besonders eingehende Versuche wurden im Auftrage des amerikanischen Congresses von 1851 bis 1861 von Humphreys und Abbot am Mississippi angestellt. Zieht man, nach diesen Forschern, an verschiedenen Punkten einer senkrechten Tiefenlinie horizontale Linien gleich den Geschw., so bilden die Endpunkte dieser Linien nahezu eine Parabel, welche an dem tiefsten Punkte der Tiefenlinie beginnt, weil dort die Geschw. gleich Null, und deren Achse der Oberfläche näher liegt als dem Boden. Die Achse, an deren Stelle die Geschw. am größten ist, liegt nicht so nahe unter der Oberfläche, wie man bisher allgemein annahm, so daß also der Reibung der Oberfläche an der Luft und der größeren Zähigkeit der obersten Schichten ein großer Einfluß zugeschrieben werden muß. Im Mississippi liegt nach jenen Forschern die Stelle der größten Geschw., der sogenannte Stromstrich, in 0,317 der Flußtiefe. Bisher hatte man, älteren Versuchen gemäß, die größte Geschw. nahe unter der Oberfläche angenommen; man bestimmte dieselbe mittels Doppelschwimmern, Schwimmstäben oder mit Woltmanns hydrometrischem Flügelrade; dann berechnete man die mittlere Geschw., indem man die größte, nach vielfachen Versuchsresultaten, mit 0,83 multiplicirte. Obwohl nun die Angaben von Henry (1873) mit denen der amerikanischen Forscher in Widerspruch stehen, da nach Jenem in breiten Strömen das Maximum der Geschw. an der Oberfläche herrschen und die Geschwindigkeitscurve eine Ellipse sein soll, deren kleine Achse in der Oberfläche liegt, so gewannen doch die amerikanischen Forschungen so viel Vertrauen, daß Hagen (1876) aus denselben eine höchst einfache Fl. für die mittlere Geschw. c in Flüssen und Strömen entwickelte. Ist α das relative Gefälle und τ der mittlere Radius, d. h. das Querprofil des Wasserlaufs dividirt durch den benetzten Umfang, so ist in Metermaß $c = 3{,}34 \sqrt{\tau} \sqrt[5]{\alpha}$; für Kanäle, Ent- und Bewässerungsgräben entwickelte Hagen eine Fl. aus den zahlreichen Messungen von Darcy u. Bazin (1865), die noch einfacher ist als die für Flüsse; es ist nämlich für jedes beliebige Maß $c = 4{,}9\, \tau \sqrt[5]{\alpha}$.

Wenn man nun die mittlere Geschw. gefunden hat, so läßt sich auch die in einem Flusse, Bache oder Kanal per Sec. fortfließende Wassermenge berechnen, indem man den gefüllten Querschnitt mit der mittleren Geschw. multiplicirt. Fließt das Wasser durch einen bestimmten Querschnitt nicht fort, sondern aus, so muß man die Contraction berücksichtigen; der Coëfficient ist 0,9 oder 0,8 oder 0,7, je nachdem der Abfluß an der Oberfläche, am Boden in seiner ganzen Breite, oder am Boden in einem Theile der Breite stattfindet. Diese Fälle treten ein, wenn man durch Anlage eines Wehres, d. i. eines durch ein Wasserbett gebauten Dammes, oder durch eine Schleuße, d. i. eine starke Bohlenwand, das Wasser ansammelt oder aufstaut, eine längere Strecke der Druckhöhe an einem Punkte concentrirt, um das Wasser dann über die Krone des Wehres oder der Schleuße auf einmal die ganze Druckhöhe herabfallen zu lassen, oder um ihm durch Oeffnen eines Schützen an einer beliebigen Stelle des Wehres oder der Schleuße Ausgang zu gestatten. Häufig leitet man zu diesem Zwecke das Wasser aus seinem eigentlichen Bette mittels Wehr und Schleuße in einen eigenen Kanal und dadurch an eine Arbeitsstelle. Für einen solchen Kanal sind nach Redtenbacher die besten Dimensionen des Kanalquerschnittes Q durch folgende Formel zu finden $b / t = 2{,}7 + 0{,}9\, Q$. Hier bedeuten b und t die Breite und Tiefe.

179 **Aufg.** 290. Wie groß ist die Ausflußgeschw. aus einem cylindrischen Gefäße von 20^{cm} Durchmesser und 1^{m} Höhe durch eine Bodenöffnung und durch eine Seitenöffnung in 40^{cm} Höhe? Aufl.: 443^{cm}, 343^{cm}. — A. 291. Wenn durch die erste Oeffnung (von 2^{mm} Durchm.) allein Wasser fortwährend mit der Anfangsgeschw. abfließt, wie groß wird dann die Geschw. nach $^1/_4$ Stunde sein? Aufl.: Inhalt des Gefäßes $= 31416^{ccm}$; Ausflußmenge in $^1/_4$ St. $= 12525^{ccm}$; Rest $= 18891^{ccm}$; Restdruckhöhe 60^{cm}; Ausflußgeschw. 343^{cm}. — A. 292. Welcher Druck muß auf eine 1^{m} hohe Wassersäule ausgeübt werden, damit an ihrem Fuße eine Geschw. von 10^{m} entsteht? Aufl.: Aus der Formel $v = \sqrt{(2gh)}$ folgt die Druckhöhe $h = v^2 / 2g = 1000^2 / 2 . 980{,}8 = 509^{cm}$; da die Säule nur 100^{cm} hoch ist, so muß der zugefügte Druck so groß sein, als eine 409^{cm} hohe Wassersäule schwer ist,

also auf jedes qcm 409g. — A. 293. Wie groß müßte der von unten nach oben wirkende Druck sein, damit oben das Wasser mit 10m Geschw. ausspritzt? Aufl.: 509 + 100 = 609g per qcm. — A. 294. Wie groß ist die Ausflußmenge in 1 Sec. aus einem ganz gefüllten Gefäße von 80cm Höhe durch eine quadr. Oeffnung von 1cm Seite in einer dünnen Wand? Aufl.: $q\sqrt{(2gh)} = 396$ccm; wirkliche Menge = 0,6.396 = 237,6 ccm. — A. 295. Wie groß ist die Ausflußmenge in 1 Min. aus einem Gefäße von 3m Höhe durch eine Kreisöffnung von 1cm Dm. in einer dicken Wand, wenn die Anfangsgeschw. bleibt? Aufl.: $0{,}8\,q\sqrt{(2gh)}$ = 28915 ccm. — A. 296. Wie hoch muß ein ganz gefülltes Gefäß sein, damit die Geschw. des am Boden ausfließenden Wassers gerade = 2g werde? Aufl.? 19,616m. — A. 297. Wie hoch, damit sie = g werde? Aufl.: 4,904m. — A. 298. Wie groß muß die Seite einer 1m hoch in einer dünnen Seitenwand gelegenen quadr. Oeffnung in einem 4m hohen, gefüllten Gefäße sein, damit in 10 Sec. bei bleibender Anfangsgeschw. 10000 ccm ausfließen? Aufl.: 1,474cm. — A. 299. In welcher Zeit wird ein Gefäß (Grundfl. = f, Höhe = h) durch eine Bodenöffnung q in einer dünnen Wand entleert sein? Anb.: $fh = x \,.\, 0{,}6q \,.\, \frac{1}{2}\sqrt{(2gh)}$; woraus $x = f\sqrt{2h} / (0{,}6q\sqrt{g})$. — A. 300. In welcher Zeit ist z. B. das Gefäß in A. 295. entleert, wenn seine Grundfläche 680 qcm ist? Aufl.: x = 270 Sec. — A. 301. Wann wird ein Teich von 4,5m Höhe, 30m Länge und 20m Breite durch eine am Boden aufgezogene Schützenöffnung von 1m Höhe und 2m Breite entleert sein? Aufl.: Contractionscoëfficient 0,7; x = 7 Min. ca. — A. 302. Wenn eine Wasseruhr oder Klepsydra (κλέπτω, entwenden; ὕδωρ, Wasser) von 30cm Höhe und 12cm Weite in einer Stunde ausfließen sollte, welchen Durchm. müßte dann die Bodenöffnung haben? Aufl.: 0,1284cm. — A. 303. Wenn die Klepsydra auch Viertelstunden zeigen sollte, wo müssen dann die 3 Marken angebracht werden? Anb.: Nach 176. verhalten sich die Abflußzeiten wie die Wurzeln aus den Druckhöhen, also diese wie die Quadrate der Zeiten, d. i. wie $1 : (\frac{3}{4})^2 : (\frac{1}{2})^2 : (\frac{1}{4})^2$; folglich sind diese Höhen = 30cm, $16\frac{7}{8}$cm, $7\frac{1}{2}$cm, $1\frac{7}{8}$cm.

5. Anwendung der Bewegung des Wassers.

180 **Der Effect des bewegten Wassers.** Das bewegte Wasser enthält wie jeder bewegte Körper lebendige Kraft, ist also ein Motor; die Wasserkraft der Niagara-Fälle entspricht einem Effect von 7 Mill. Pferden, was mehr ist als alle Maschinen auf der ganzen Erde zusammen leisten. Da uns die Natur diesen Motor selbst darbietet, so wurde das bewegte Wasser seit den ältesten Zeiten zur Bewegung von Kraft- oder Triebmaschinen verwendet, um mittels derselben Arbeiten zu vollbringen. Der Effect des bewegten Wassers, d. i. die Arbeit, welche das in einer Sec. zur Kraftmaschine herbeifließende Wasser zu entwickeln vermag, wird bekanntermaßen gemessen durch seine lebendige Kraft, d. i. das halbe Product der Masse dieses Wassers mit dem Quadrat der Geschwindigkeit desselben, oder auch durch seine Spannkraft, d. i. das Product des Gewichtes dieser Wassermasse mit der Höhe, welche dieselbe durchfällt oder durchfallen müßte, um jene Geschwindigkeit zu erreichen. Diese beiden Messungsarten liefern dasselbe Resultat.

Denn bedeutet Q das in 1 Sec. herbeiströmende Wasservolumen in cbm, ist also das Gewicht desselben 1000Qkg, die Masse des Gewichtes $\frac{1}{g} \,.\, 1000\,Q$, und die Geschw. des Wassers = v, so ist die in 1 Sec. entwickelte lebendige Kraft = $\frac{1}{2g} \,.\, 1000\,Q \,.\, v^2$. Nach der zweiten Messungsart ergibt sich die in 1 Sec. entwickelte Arbeit oder Spannkraft = 1000 Q . h, wenn h die Höhe ist, die das Wassergewicht 1000 Q herabfallen kann. Nun erhält aber das Wasser, welches diese Höhe h herab- oder unter dieser Druckhöhe abfließt, die Geschw. $v = \sqrt{(2gh)}$, woraus $h = v^2 / 2g$. Durch Substitution dieses Werthes von h in den Werth für die Arbeit ergibt sich derselbe = $\frac{1}{2g} \,.\, 1000\,Q \,.\, v^2$, welches ganz mit der leb. Kft. übereinstimmt; also liefern beide Messungsarten dasselbe Resultat. Indessen ist es doch gebräuchlicher, die Messung des Effectes auf die zweite Art vorzunehmen, durch Multiplication des secundlichen Wassergewichtes mit der nutzbaren Fallhöhe. Das Wassergewicht erhält man nach 178., die Fallhöhe bestimmt man vor dem Anbau durch ein Nivellement; nach der Anlage von Wehr oder Schleuße hat man dagegen nur die Höhe des Spiegels des Oberwassers (oberhalb der Schleuße) über dem Spiegel des Unterwassers (unterhalb der Schleuße) zu messen, und endlich, wo Beides nicht angeht, sucht man nach 178. die Geschw. und aus derselben durch die Formel $h = v^2 / 2g$ die Fallhöhe.

Der also gefundene, in dem Wasser enthaltene Effect wird aber durchaus nicht in seinem ganzen Betrage von der Kraftmaschine auf die Arbeitsmaschinen übertragen, sondern ein Theil dieses theoretischen oder absoluten Effectes geht verloren, und

zwar aus folgenden Gründen: das Wasser fließt aus der Kraftmaschine mit einer gewissen Geschw., hat also auch nicht seine ganze Geschw., seinen ganzen Effect an dieselbe abgegeben; bei mancher Kraftmaschine fließt oder spritzt ein Theil des Wassers an derselben vorbei, ohne auf sie einzuwirken; wirkt das Wasser stoßend auf die Kraftmaschine, so entstehen Erschütterungen, die einen Theil der leb. Kft. nutzlos in die Erde fortpflanzen; dieses geschieht auch durch die Reibung des Wassers an dem Wehre oder der Schleuße, an seinem Bette oder Gerinne und an der Kraftmaschine, sowie durch die Reibung der Achse dieser Maschine in ihren Lagern. Durch alle diese Effectverluste bleibt der Nutzeffect, den die Kraftmaschine zu leisten vermag, oft bedeutend hinter dem absoluten Effecte des Wassers zurück. In dieser Beziehung sind aber die Kraftmaschinen sehr verschieden; während ein frei im Flusse hängendes Schiffmühlenrad höchstens einen Nutzeffect von 20 % des absoluten Effectes erzielt, steigt derselbe bei vollkommenen Henschel-Turbinen bis zu 84 % und bei dem Schmid'schen Motor bis zu 90 %; die Wasserkraftmaschinen überragen hierin bedeutend die Dampfmaschinen, denn diese liefern durchschnittlich noch nicht 10 % der durch die verbrannten **Kohlen** erzeugten Kraft der Wärme.

181 Aufg. 304. Wie groß ist der absolute Effect des Wassers in einem Kanale von 2^m Breite, Wasserhöhe $0{,}5^m$, wenn das Wasser über ein 3^m hohes Wehr abfällt und in dem Kanale 1^m Geschwindigkeit hat? Aufl.: $3000^{mk} = 40^{\circ}$. — A. 305. Am Fuße einer Schleuße, hinter welcher das Wasser 2^m hoch steht, wird ein Schützen aufgezogen, $0{,}6^m$ br. u. $0{,}2^m$ hoch; wie groß ist der abs. Eff.? Aufl.: $\frac{1}{20} . 0{,}7 . 0{,}6 . 0{,}2 . \sqrt{(2 . 10 . 2)}\, 1000 . (2 . 10 . 2) = 1062^{mk}$. — A. 306. An einem Schiffmühlenrade, dessen Schaufeln 2^m lang und 1^m breit sind, beträgt die Geschw. des Flusses $1{,}5^m$; welches ist der Nutzeffect? Aufl.: $67{,}5^{mk}$. — A. 307. Ein Bach fließt in der ganzen Breite eines 2^m breiten Gerinnes unter einem Schützen $0{,}5^m$ hoch mit 1^m Geschw. aus und fällt 4^m herab; welches ist der Effect? Aufl.: $3600^{mk} = 48^{\circ}$. — A. 308. Das Gerinne für eine gute Henschel-Turbine ist $1{,}5^m$ breit, das Wasser ist 1^m hoch, fließt mit $0{,}4^m$ Geschw. und ist 6^m über dem Unterwasser; wie groß ist der Nutzeffect? Aufl.: 3024^{mk}.

182 **Die Wasserräder.** Die hydraulischen Kraftmaschinen haben meistens die Form von Rädern, welche an ihren Umfängen ebene oder gekrümmte Schaufeln oder auch Zellen tragen, auf die das fließende Wasser durch seine leb. Kft. oder seine Spannkraft oder durch Beides einwirkt und so dem Rade seine Arbeitskraft mittheilt. Man unterscheidet verticale Wasserräder (Wasserräder im engeren Sinne) und horizontale Wasserräder (Turbinen); durch die ersteren wird eine horizontale, durch die letzteren eine verticale Achse in Umdrehung versetzt. Hieraus ergibt sich schon, in welchen Fällen man Wasserräder, und in welchen man Turbinen anwendet; doch eignen sich die ersteren besonders, und oft ausschließlich (in Flüssen) bei geringerem Gefälle, die letzteren dagegen besonders bei hohem Gefälle mit geringer Wassermenge wie z. B. bei Gebirgsbächen.

Läßt man das Wasser durch Herabstürzen von einem Wehre oder durch Ausfluß des angestauten Wassers aus einer Schützenöffnung am Fuße eines Wehres oder einer Schleuße seine ganze mögliche leb. Kft. annehmen, und läßt man es dann erst auf die untersten Schaufeln eines Rades wirken, so hat man das *unterschlächtige Wasserrad*. Dasselbe wird am Besten angewendet bei einer großen Wassermenge mit geringem Gefälle, wie z. B. an Schiffmühlen. Es gehen 75 % des Effectes verloren, weil das Wasser stoßend wirkt und mit großer Geschw. von dem Rade abfließt. Erhält dasselbe nach Poncelet (1826) gekrümmte Schaufeln (Fig. 104), so wird der letztere Mißstand mehr vermieden und das Rad liefert dann über 60 % des Effectes. Ebenso viel gibt auch ungefähr das *mittelschlächtige Wasserrad* (Fig. 105), welches mit seinem wirksamen Theile in ein Gerinne mit fast an das Rad herantretenden aufrechten Wänden eingeschlossen ist, so daß das auf die Schaufeln fließende Wasser nicht blos durch seine leb. Kft., sondern auch durch seine Spannkraft wirkt. Weil aber dennoch zu beiden Seiten der Schaufeln Wasser wirkungslos vorbeifließt, und das wirksame Wasser durch Reibung an dem Gerinnboden Kraft einbüßt, so wird dieses Rad noch übertroffen von dem *oberschlächtigen Wasserrade*. Dieses trägt an seinem Umfange beiderseits geschlossene Zellen, in welche das Wasser ohne Stoß an der höchsten Stelle des Rades einfließt; hierdurch wirkt das Wasser mit seiner ganzen Spannkraft. Nur dadurch, daß dasselbe schon vor dem tiefsten Punkte theilweise aus den Zellen fließt, und daß wegen des vom Rade getragenen Wassergewichtes die Achsenreibung groß ist, wird etwa ¼ von dem Effecte verzehrt, so daß dieses Rad etwa 75 % von dem Effecte producirt. Doch ist dasselbe nur bei größerem Gefälle anwendbar; denn anderen-

falls müßte es klein werden, müßte sich daher schnell bewegen, wodurch das Wasser wegen großer Schwungkraft aus den Zellen geschleudert würde.



Fig. 104.

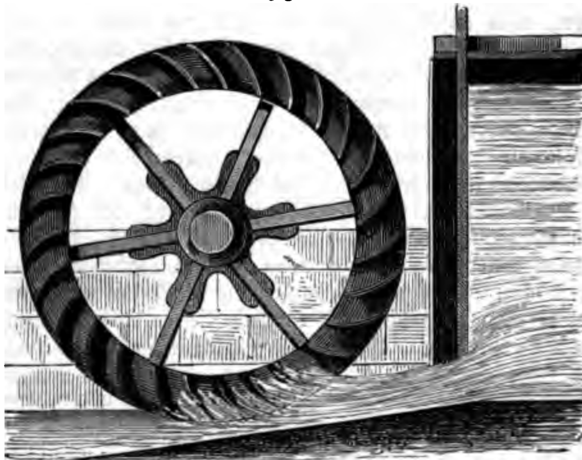
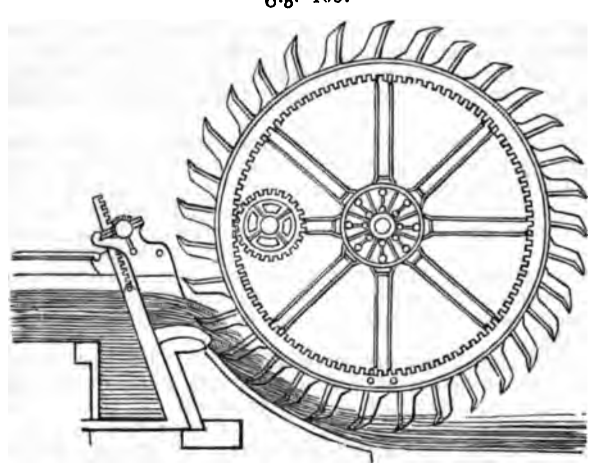


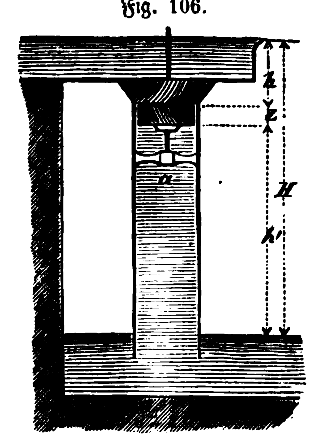
Fig. 105.



183 **Die Turbinen.** Weil die Turbinen aus dem Streben hervorgegangen sind, das Princip des Segner'schen Wasserrades für die Technik nutzbar zu machen, so hat die älteste Einrichtung, **Fourneyrons Turbine** (1834) noch einige Aehnlichkeit mit jenem Reactionsrade; doch wirkt das Wasser hier nicht durch Reaction, sondern durch den Druck seiner lebendigen Kraft. An dem unteren Ende einer aufrechten Achse ist ein Teller befestigt, der auf seinem Rande gekrümmte Schaufeln trägt, welche oben mit einem Ringe bedeckt sind. Innerhalb dieses Schaufelrades befindet sich eine mit Leitschaufeln von entgegengesetzter Krümmung besetzte kreisförmige Eisenplatte, welche an dem festen Gehäuse des Baues befestigt ist. In dieses Gehäuse fließt das Wasser, erhält durch die Leitschaufeln eine radiale Richtung und fließt so gegen die Radschaufeln, drückt auf dieselben und dreht daher das Rad in entgegengesetzter Richtung, als das Wasser ausfließt. Mit dieser Einrichtung kann selbst eine kleine Wassermenge, wenn sie nur eine große Druckhöhe hat, einen bedeutenden Effect erzielen. So findet sich in St. Blasien im Schwarzwalde eine Fourneyron'sche Turbine, welche durch 0,04cbm Wasser per Secunde mit 108m Gefälle 2300 Drehungen in 1 Min. macht und eine große Spinnerei in Bewegung setzt, obwohl sie nur ca. 30cm Durchmesser hat. Fourneyrons Turbine liefert 75 bis 80 % des Effectes, hat aber den Nachtheil, daß das Rad am tiefsten Punkte der Druckhöhe aufgestellt werden muß, wodurch man nur sehr schwer zu demselben und zu dem noch unter ihm befindlichen Achsenlager gelangen kann; dann daß das Wasser starke Richtungsänderungen erleiden muß, um aus dem Gefäße durch die Leitkanäle an die Radschaufeln zu kommen; und endlich, daß bei einer Abnahme des Oberwassers der Umfang des Rades durch einen ringförmigen, von oben herabgelassenen Schützen theilweise geschlossen werden muß, wodurch ruhendes Wasser im Rade ist, das wirkungslos mitgedreht wird und an welchem sich das abfließende Wasser reibt. Den letzteren Mißstand hat in neuerer Zeit Girard in seiner **hydropneumatischen Turbine** dadurch zu mildern gesucht, daß er das luftdicht eingeschlossene Rad in comprimirter Luft laufen läßt, wodurch das ruhende Wasser in dem Rade herabgedrückt wird. Aber alle jene Mißstände sind zusammen beseitigt in der **Henschel-Turbine**, die man gewöhnlich Jonval-Turbine nennt, weil sie zuerst von Jonval (1841) öffentlich beschrieben wurde, während

Oberbergrath Henschel in Cassel sie schon 1832 entworfen und 1841 in Holzminden aufgestellt hat. In dieser Turbine befindet sich, wie Fig. 106 und 107 zeigen, das feste Leitschaufelrad über dem Turbinenrad, wodurch die Richtungsänderungen ermäßigt werden. Dann taucht das luftdichte cylindrische Gefäß in das Unterwasser, und der Abfluß wird durch einen Schützen s nach dem Zuflusse regulirt; hierdurch wird die theilweise Füllung des Rades vermieden, Gefäß und Räder sind immer gefüllt, und das Rad kann an jede beliebige Stelle des Gefäßes gebracht und dadurch sammt dem Achsenlager a leicht zugänglich gemacht werden. Diese ganz besondere Eigenthümlichkeit dieser Turbine liegt darin, daß der Druck an allen Stellen des Gefäßes derselbe ist, nämlich gleich dem Gewichte der Wassersäule H (Fig. 106). Denn es sei der Luftdruck = A, so wirkt an der unteren Grenze der Leitschaufeln von oben nach unten der Druck $A + h$, aber von unten nach oben $A - (h_1 + z)$; folglich bleibt ein Druck von oben nach unten $= (A + h) - [A - (h_1 + z)] = h + h_1 + z = H$. Wie man nun auch die drei Größen h, h_1 und z wählen möge, immer bleibt ihre Summe = H; folglich ist der Druck von oben nach unten an allen Stellen des Rohres derselbe; die beiden Räder können in dem Rohre jede beliebige Lage haben, vorausgesetzt, daß die vom Luftdrucke zu tragende Wassersäule $h_1 + z$ nicht über die Größe des Luftdruckes hinausgehe, also unter 10^m bleibe.

Fig. 106.



Es gibt auch Kraftmaschinen, in denen das Wasser durch Stoß wirkt; alsdann wird aber die leb. Kft. des Wassers nur dann in nennenswerthem Betrage von der gestoßenen Radschaufel aufgenommen, wenn die Fläche derselben 6—8 mal größer ist als der Querschnitt des Wasserstrahles, weil nur dann die von der Aufschlagstelle ringsum mit großer Geschw. abfließenden Wassertheilchen ihre Geschw. großentheils abgeben können. Hieraus folgt, daß Stoßräder nur bei kleinen Wassermengen anwendbar sind. Die Stoßwirkung ist der leb. Kft. proportional, also dem Querschnitte des Strahles und dem Quadrat der Differenz zwischen der Geschw. desselben und der Geschw. der Radschaufel. — Den Stoß des Wassers benutzt man auch in einer Wasserbeförderungsmaschine ohne Kolben, nämlich in dem hydraulischen Widder (Montgolfier 1796). Das aus einiger Höhe in einer Röhre fortfließende Wasser fließt durch eine obere Oeffnung der Röhre aus und erhält an dieser Oeffnung eine solche Energie, daß es ein Ventil an dieser Oeffnung schließen kann; dadurch ist es gezwungen, mit großer Geschw. weiter zu fließen, und kann deßhalb ein in einen Windkessel führendes Ventil aufstoßen, in den Windkessel einströmen, dort die Luft verdichten und durch deren verstärkte Spannung, dem Princip der Windkessel gemäß (s. 204.), gehoben werden.

Fig. 107.

Da in neuerer Zeit in vielen Städten Wasserleitungen eingerichtet worden sind, durch welche Wasserkräfte von 20 bis 100^m Druckhöhe zu Gebote stehen, so hat man Maschinen gebaut, die von diesem Wasser getrieben werden, sogen. **Wassermotoren**, welche in zahlreichen Fällen, besonders im Kleinbetriebe, nützliche Anwendung finden und möglicherweise zum Betriebe der elektrischen Lichtmaschinen eine große Zukunft haben werden. Wir wollen

deßhalb einen solchen Wassermotor näher betrachten. Wie der Längenschnitt (Fig. 108) und die Seitenansicht (Fig. 109) des Motors von Schmid in Zürich zeigen, ist der Hauptbestandtheil ein Cylinder ab, in welchem durch das Wasser ein Kolben hin- und herbewegt wird, wie in der Dampfmaschine durch den Dampf. Hierdurch wird auch die mit dem Kolben fest verbundene Stange, die Kolbenstange, welche luftdicht durch die Stopfbüchse des Cylinderdeckels geht, hin- und herbewegt, und dadurch die Welle des Schwungrades in Umdrehung versetzt. Diese Welle ist nämlich an der Stelle, wo die Kolbenstange an sie herantritt, U-förmig ausgebogen, verkröpft, und eben an den wagrechten Grund dieser Ausbiegung ist die Kolbenstange angelenkt, so daß die hin- und hergehende Bewegung der Kolbenstange sich in eine drehende der Welle verwandeln muß. Dies ist die einfache Haupteinrichtung des Motors; ein wesentliches Nebenelement ist die Steuerung, d. i. die Vorrichtung, durch welche das Wasser gezwungen wird, abwechselnd vor und hinter den Kolben zu treten, sowie vor dem Kolben abzufließen, wenn es hinter demselben wirkt, und hinter dem Kolben abzufließen, wenn es vor demselben wirkt. Diese Steuerung besteht aus den unter dem Cylinder sichtbaren zwei Kanälen, die an beiden Enden des Cylinders in denselben einmünden, sowie daraus, daß der Cylinder ein oscillirender ist. Faßt man z. B. einen runden Bleistift an beiden Seiten zwischen Daumen und Zeigefinger und wiegt an dem einen Ende den Stift auf und ab, so hat man einen oscillirenden, wiegenden oder schwingenden Cylinder. In dem Schmid'schen Wassermotor bewegt

Fig. 108.

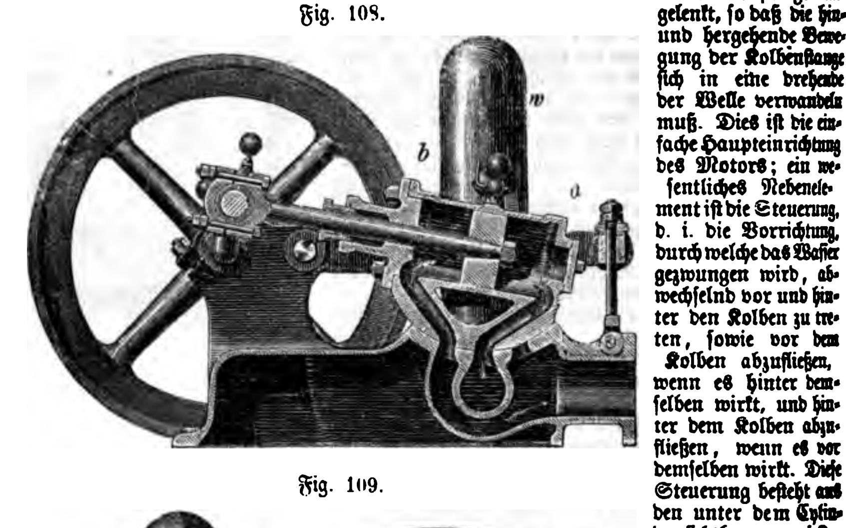
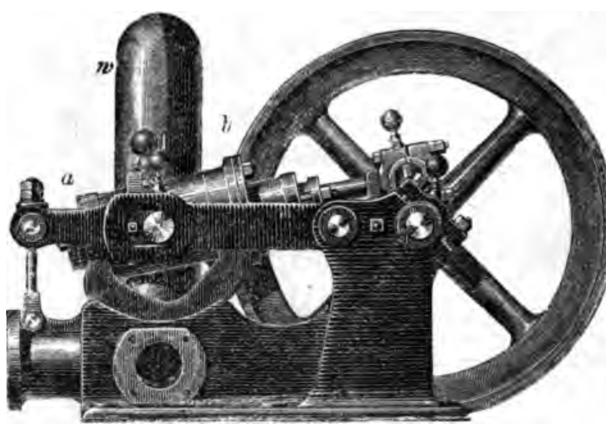


Fig. 109.



sich bei der Drehung der Welle das linke Ende der Kolbenstange (Fig. 108) nicht blos hin und her, sondern auch auf und nieder; folglich muß die Kolbenstange die linke Hälfte des Cylinders ebenfalls auf und nieder drücken. Der Cylinder kann diesem Drucke nachgeben, weil er nicht mit dem Gestelle der Maschine verschraubt ist, sondern vornen und hinten in der Mitte seiner Länge Zapfen trägt, die in Lagern ruhen (Fig. 109). Wenn so der Cylinder oscillirt, dann muß auch das mit ihm verbundene, unten kreisförmig abgeschliffene Gehäuse der beiden Kanäle sich abwechselnd nach links und rechts drehen. Hierbei schleift es auf dem genau gleich kreisförmig abgeschliffenen oberen Rande des Maschinengestells hin und her, der die Zu- und Abflußkanäle des Wassers enthält. Der kleine schwarz schraffirte Kreis ist der Zuflußkanal, und rings um denselben zieht sich der Abflußkanal. In der Stellung, die der Cylinder in Fig. 108 hat, fließt das Wasser aus dem Zuflußkanal in den rechten Cylinderkanal, wie durch Pfeile angedeutet ist, gelangt so hinter den Kolben und treibt den-

selben durch seinen Druck voran, während das Wasser vor dem Kolben durch den linken Cylinderkanal in den Abflußkanal abströmt. Wenn der Kolben rückwärts geht, so neigt sich der Cylinder links nach unten, wodurch sich das Kanalgehäuse nach rechts bewegt. Hierdurch kommt der linke Cylinderkanal außer Verbindung mit dem Abflußkanal, aber in Verbindung mit dem Zuflußkanal, so daß jetzt das Treibwasser vor den Kolben strömt und denselben zurückschiebt; das Wasser hinter dem Kolben fließt dann durch den rechten Steuerkanal und eine rechts von dem schwarzen Loch sichtbare Oeffnung in den Abflußkanal. Die Bewegung der Maschine ist eine sehr ruhige und gleichmäßige, weil das Wasser nur durch seine Druckhöhe, nicht aber durch Stoß wirkt, ein großer Vorzug dieses Motors gegen die kleinen Gas- und Luftmotoren; und damit Stöße, die beim raschen Schließen der Zuflußkanäle oder durch andere Zufälle sich einstellen, unschädlich gemacht werden, steht der Zuflußkanal auf der hinteren Seite der Maschine mit dem hoch emporsteigenden Windkessel w in Verbindung. Die Maschine kann auch als Pumpe angewendet werden, wenn sie z. B. von einer anderen gleichen mit Wasser, Dampf oder Luft getriebenen Maschine in Gang gesetzt wird. Die Maschinenfabrik von Schumacher in Köln baut diesen Motor von 0,1 bis 36° zu dem Preise von 300 bis 3000 Mark, und der Wasserbetrieb kostet per Pferdekraft und Stunde kaum 1/2 Mark; der Nutzeffect erreicht die seltene Höhe von 80 bis 90 Procent.

Dritte Abtheilung.

Die Mechanik der luftförmigen Körper oder die Aeromechanik.

(Aerostatik und Pneumatik.)

1. Grundeigenschaften der Luftarten.

184 Luftförmig ist ein Körper, wenn seine Theilchen durch die geringste Kraft verschoben werden können, aber keinen Zusammenhang, sondern im Gegentheil das Bestreben haben, nach allen Richtungen aus einander zu gehen. Dies ist nach 54. der Fall, wenn sämmtliche Moleküle eines Körpers in sehr rascher fortschreitender Bewegung (bis zu 1844^m Geschwindigkeit) nach allen Richtungen begriffen sind, so daß durch die lebendige Kraft der Moleküle ihre gegenseitige Anziehung weit überwogen wird. Demnach würde ein frei im Weltraume befindliches Luftvolum sich durch den ganzen unendlichen Raum ausbreiten; die Lufthülle oder Atmosphäre der Erde dagegen kann dies nicht, weil die Anziehung der Erde stärker wirkt als die lebendige Kraft der Luftmoleküle. Die Luftarten stimmen also darin mit den festen und flüssigen Körpern überein, daß sie der Schwere unterworfen sind, daß sie also auch ein Gewicht haben oder einen Druck auf ihre Unterlage ausüben. Sie stimmen mit den Flüssigkeiten in der absolut leichten Beweglichkeit ihrer Theilchen überein und unterscheiden sich mit diesen hierin von den festen Körpern; von den flüssigen unterscheiden sie sich durch ihre Ausdehnsamkeit, ihr Bestreben, sich vermöge der fortschreitenden Bewegung ihrer Moleküle nach allen Richtungen auszubreiten. Aus dieser Erklärung des Wesens der Luftarten ergeben sich folgende Grundeigenschaften derselben:

a. Die Luftarten haben wie die Flüssigkeiten absolut leicht bewegliche Theilchen; es gelten daher alle Gesetze, die sich für die Flüssigkeiten aus dieser leichten Beweglichkeit ergaben, auch für die Luftarten: so das Gesetz von der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes nach allen Richtungen, das Gesetz über den Auftrieb, die Gesetze über den Ausfluß.

b. Die Luftarten haben wegen dieser leichten Beweglichkeit keine selbständige Gestalt; wegen ihres Ausbreitungsbestrebens oder ihrer Ausdehnsamkeit haben sie aber auch kein selbständiges Volumen. Hierin unterscheiden sie sich von den Flüssigkeiten, ebenso auch in allen Eigenschaften, die sich aus der Ausdehnsamkeit ergeben.

c. Die Luftarten sind sehr stark und leicht zusammendrückbar; denn vermöge ihrer Ausdehnsamkeit sind die Theilchen der Luft sehr weit von einander entfernt, können also eine starke Annäherung erleiden. Bei einer im Gleichgewichte befindlichen Luftmenge ist das Ausdehnungsbestreben durch einen äußeren Druck aufgehoben; folglich ist der Beginn

des Zusammendrückens sehr leicht. Soll das Zusammendrücken weitergehen, so gilt das Mariotte'sche Gesetz (54.), was wir noch näher betrachten werden.

d. Wegen ihrer Ausdehnsamkeit übt jedes Volumen von Luft einen Druck auf die Grenzen des Volumens aus, der entweder durch die Ausdehnsamkeit der umgebenden Luft oder durch die Festigkeit der Grenzwände aufgehoben wird; dieser Druck, Spannung oder Expansion genannt, wächst mit der Dichte, weil mit dieser die Zahl der gegen die Grenze stoßenden Luftmoleküle und der Stöße jedes Moleküls (54.) vermehrt wird (Mariottes Gesetz).

e. Wegen ihrer Ausdehnsamkeit und wegen der weiten Entfernung der Luftmoleküle von einander dringen die Luftarten in einander ein, sie haben Diffusion gegen einander.

f. Ebenso dringen die Luftarten in die Poren der festen Körper und in die Molekularzwischenräume der Flüssigkeiten ein und werden, wenn sie denselben so nahe kommen, daß die gegenseitige Anziehung die lebendige Kraft der zurückprallenden Luftatome überwiegt, von denselben festgehalten oder absorbirt; endlich kann sich auch auf den Oberflächen fester Körper eine Schicht verdichteter Luft, eine Lufthaut, anhäufen.

g. Die atmosphärische Luft wird nach oben immer weniger dicht; denn die unteren Luftschichten werden durch das Gewicht der oberen zusammengedrückt; nach oben wird aber die Höhe und daher das Gewicht der drückenden Luftmasse immer kleiner, also auch die Zusammenpressung immer geringer, die Luft immer dünner. So ist in einer Höhe von 10 M. die Luft 7000 mal dünner als auf der Erdoberfläche, in einer Höhe von 30 M. würde sie 250 Mill. mal dünner sein.

Ueber die Höhe der Atmosphäre sind die Forscher noch nicht einig; jedoch sprechen in der letzten Zeit die meisten Stimmen für 40 bis 50 M. Liais beobachtete in der tropischen Zone, daß die obersten Schichten der Atmosphäre schon Sonnenlicht reflectiren, wenn die Sonne noch 18° unter dem Horizont steht; daraus ergab sich die Entf. der Schichten von der Erdoberfläche gleich 43 M. Das Aufleuchten der Sternschnuppen erklärt man aus ihrer Erhitzung durch den Luftwiderstand; durchschnittlich findet das Aufleuchten in Höhen von 16 bis 18 M. statt; indessen ist es auch schon in 40 M. Höhe beobachtet worden, woraus man schließen muß, daß noch in jener Höhe sich Luft befindet, allerdings vorausgesetzt, daß keine andere Ursache des Leuchtens besteht. Nach den Gesetzen der mechanischen Wärmetheorie fand Ritter (1878) eine Höhe von 4 M., wenn angenommen wird, daß die Gase der Atmosphäre bis zur Grenze vollkommene Gase bleiben, und 47 M. für eine Atm. von reinem Wasserdampf; da jene Annahme in der niedrigen Temp. der oberen Luftschichten keine Geltung haben kann, sondern die Gase dort als condensirbar gedacht werden müssen, so gilt das letzte Resultat. Kerber (1881) faßte die Lufthülle als ein brechendes Medium mit Kugelfläche auf, bestimmte die Brenn-, Knoten- und Hauptpunkte desselben und berechnete daraus eine Höhe von 25 M. — Der Stoff der Atmosphäre enthält 78,492% Stickstoff, 20,627% Sauerstoff und 0,041% Kohlendioxyd; dazu kommt eine wechselnde Menge von Wasserdampf, im Mittel 0,84%.

185 **Der Luftdruck** (Torricelli 1643). Wenn auch die Luft 777 mal leichter ist als Wasser und nach oben hin immer leichter wird, so ist doch das Gewicht der Atmosphäre oder der Druck auf ihre Unterlage wegen ihrer bedeutenden Höhe sehr groß. Der Druck auf eine beliebige Fläche ist (nach 156.) gleich dem Gewichte einer Luftsäule, deren Grundfläche die Fläche ist und deren Höhe gleich dem Abstande dieser Fläche von der Luftgrenze ist. Da man diese Höhe nicht genau kennt, so kann man auch jenen Druck, den man Luftdruck nennt, nicht berechnen; man muß denselben daher durch einen Versuch bestimmen. Dieser Versuch wurde zuerst von Torricelli angestellt und ist ebenso einfach wie entscheidend. Man füllt eine durch einen Hahn verschlossene, etwa 80^{cm} lange, graduirte Glasröhre mit Quecksilber, verschließt die Oeffnung mit dem Finger, kehrt die Röhre um und taucht sie mit dem schließenden Finger in ein mit Quecksilber gefülltes Glasgefäß. Zieht man nun den Finger weg, so beginnt das Quecksilber in der Röhre zu fallen, bleibt aber sogleich wieder etwa bei 76^{cm} Höhe stehen und ist durch kein Schütteln und Aufstoßen der Röhre zum Fallen zu bewegen. Es steht also das Quecksilber in der mit dem Gefäße communicirenden Röhre 76^{cm} höher als in dem Gefäße, während es nach dem Satze der communicirenden Gefäße beiderseits gleich hoch stehen müßte. In communicirenden Gefäßen kann der Stand einer Flüssigkeit nur dann verschieden sein, wenn auf den Spiegel in dem einen Gefäße ein größerer Druck ausgeübt wird, als auf den Spiegel in dem anderen Gefäße; der erste Spiegel

senkt sich dann, der zweite hebt sich. Folglich muß auch in unserem Versuche auf dem äußeren Spiegel ein größerer Druck vorhanden sein als auf dem inneren. Ueber diesem inneren Spiegel ist keine Luft; man nennt diesen luftleeren Raum Torricellis Vacuum oder Leere; es wird also auf den inneren Spiegel kein Druck ausgeübt. Auf dem äußeren Spiegel aber ruht nichts als Luft; folglich kann es nur die Luft sein, die auf den äußeren Spiegel einen Druck ausübt und dadurch das Quecksilber in der Röhre 76^{cm} in die Höhe treibt. Daß wirklich ein solcher Druck auf den äußeren Spiegel das Quecksilber in der Röhre hebt, kann man durch einen gut schließenden ringförmigen Kolben beweisen, den man auf den äußern Spiegel setzt; ein Druck auf diesen Kolben bringt das Quecksilber in der Röhre zum Steigen. Dagegen fällt dasselbe ganz herab bis zur Höhe des äußeren Spiegels, wenn man durch Oeffnen des Hahnes Luft in das Vacuum treten läßt und dadurch den Druck beiderseits gleich groß macht. Aus diesem Versuche erhellt sonach der Satz: *Der Luftdruck ist gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76^{cm} Höhe.*

Doch ist dies keine gesetzmäßig feststehende Größe, sondern nur ein Mittelwerth für die ebene Oberfläche der Erde, etwa in der Höhe der Meeresfläche; denn auch auf dieser ändert sich der Luftdruck nach Zeit und Ort und schwankt etwa zwischen 70 und 80^{cm} Quecksilberhöhe; wenn man sich aber gar nach oben von derselben entfernt, so wird der Luftdruck immer kleiner, beträgt z. B. auf dem Chimborasso weniger als halb so viel. Der mittlere Luftdruck von 76^{cm} Quecksilber läßt sich auch als Gewicht ausdrücken. So ist z. B. *der Luftdruck auf 1^{qcm} nahezu gleich 1^{kg}*, weßhalb man den Druck von 1^{kg} auf 1^{qcm} *eine Atmosphäre* nennt und mit 1^{at} bezeichnet; denn der Luftdruck auf 1^{qcm} ist gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 1^{qcm} Grundfläche und 76^{cm} Höhe, also von 76^{ccm} Inhalt; da nun 1^{ccm} Quecksilber $13{,}59^{g}$ wiegt, so ist der Luftdruck auf $1^{qcm} = 13{,}59 \,.\, 76^{g} = 1{,}0328^{kg}$, und auf $1^{qm} = 10328^{kg}$. Demnach hat eine gewöhnliche Tischplatte mehr als 200 Ctr. Luft zu tragen. Daß sie unter der Last nicht zerbricht, hat einfach seinen Grund in dem Princip der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes, vermöge dessen der Druck nicht blos von oben nach unten, sondern auch von unten nach oben stattfindet, ja an jeder beliebigen Stelle nach allen Seiten gleich groß ist. Folglich ist der Druck nur merkbar, wenn er in irgend einer Richtung beseitigt wird; dann kann er in den übrigen Richtungen wirken und sich so manifestiren. Wir werden auf diese Weise durch eine Reihe von Luftpumpenversuchen den Luftdruck nachweisen. Vielleicht erklärt sich so mancher Unglücksfall in Schlachten: wenn eine größere Kugel sehr nahe an einem Menschen vorbeifliegt, so reißt dieselbe die Luft mit sich fort, erzeugt also einen luftleeren Raum auf der einen Seite des Menschen; von der anderen Seite oder auch von innen wirkt dann der Luftdruck mit seiner großen Stärke, schleudert den Menschen zu Boden oder zerstört innere Gefäße. Der Gesammtdruck der Luft auf die ganze Oberfläche des Menschen ist bedeutend; denn der Mensch hat ungefähr $1\frac{1}{2}^{qm}$ Oberfläche, erfährt also einen Druck von etwa 15000^{kg} oder 300 Ctr. Dieser große Druck aber quetscht uns ebenso wenig zusammen, als er überhaupt unter gewöhnlichen Umständen uns merkbar wird; denn er findet auch von innen nach außen, ja zu beiden Seiten jedes kleinsten Theilchens statt. Auf kleine Theilchen ist derselbe aber sehr klein, und unter demselben sind die kleinsten Elementar-Organe entstanden, sind also zur Ertragung desselben gebildet. Daß der Luftdruck in dem Menschen auch von innen nach außen wirkt, beweisen uns die Schröpfköpfe und künstlichen Blutegel, sowie das Hervordringen von Blut bei raschem Aufsteigen mit Luftballonen. Der Luftdruck ist dem Menschen sogar sehr nützlich; denn er trägt unsere Arme und Beine. Die Gelenkköpfe derselben füllen nämlich die Gelenkpfannen nicht aus, sondern lassen einen luftleeren Raum übrig, gegen welchen die äußere Luft die Glieder anpreßt. Werden sämmtliche Beinmuskeln und Bänder an einem Cadaver abgeschält, so fallen die Beine noch nicht aus den Gelenkhöhlen; bohrt man aber die Seitenwand der Gelenkhöhle durch, so daß Luft in dieselbe strömen kann, so löst sich sofort das Glied ab. — Man kann den Luftdruck auch mit einer Wassersäule vergleichen: das Wasser ist 13,59 mal leichter als Quecksilber; damit eine Wassersäule dem Luftdrucke das Gleichgewicht halte, muß sie deßhalb $13{,}59 \,.\, 76^{cm} = 10{,}328^{m}$ hoch sein. *Der Luftdruck ist demnach auch gleich dem Gewichte einer Wassersäule von etwa 10^{m} Höhe.* Der Umstand, daß der Luftdruck nicht eine höhere Wassersäule als von 10^{m} heben kann, gab Torricelli die Veranlassung zur Entdeckung des Luftdruckes. Dieses Tragen von Wasser durch den Luftdruck zeigt uns jedes vollgefüllte, mit Papier bedeckte und dann umgekehrte Glas. Wir benutzen es in der pneumatischen Wanne, um Glasgefäße mit Gas zu füllen; das Gefäß wird zuerst mit Wasser gefüllt, mit der Hand verschlossen und dann umgekehrt in das Wasser gestellt; nach

weggezogener Hand fällt das Wasser nicht heraus. Bringt man nun die Oeffnung eines Gasentbindungsrohres unter die Mündung, so steigt das Gas in Blasen vermöge des Auftriebes in die Höhe und verdrängt das Wasser. Auch aus anderen gefüllten und oben geschlossenen Gefäßen fließt eine Flüssigkeit nur, wenn durch die Oeffnung Luft eindringen kann, aus sehr engen Bodenöffnungen oder aus etwas ansteigenden Seitenöffnungen gar nicht, aus weiteren Oeffnungen nur dann in einem dicken Strahle, wenn auch oben Luft zugelassen wird; so muß man an Fässern das Spundloch öffnen, an Kannen dürfen die Deckel nicht luftdicht schließen. — Der Luftdruck, welcher irgendwo herrscht, pflanzt sich mit großer Raschheit durch die Umgebung fort und zwar selbst durch die feinsten Risse und Spalten; so herrscht in unseren Zimmern, obwohl dieselben nur wenig Luft enthalten, derselbe Druck wie außen; und zwar ist der Druck in derselben horizontalen Ebene überall gleich groß. Aus der Größe des Luftdruckes auf 1^{qcm} läßt sich der Druck auf die ganze Erdoberfläche, also das Gewicht der ganzen Atmosphäre leicht berechnen; man findet dasselbe = 5,19 Billionen Kilogramm.

186 **Aufg.** 309. Wie groß ist der Luftdruck auf einen Tisch von 1^m Länge und $^1/_2{}^m$ Br., auf einen Kreis von 1^{dm} Durchmesser, auf ein Haus von 20^m Länge und 10^m Breite, auf eine Kugel von 1^{dm} Durchmesser? Aufl.: 5164^{kg}, 81^{kg}, 2 Mill. kg, 324^{kg}. — A. 310. Wie groß ist der Druck auf einen Dampfkolben von 8^{dm} Durchmesser durch 2 Atmosphären Dampf, wenn auf der anderen Seite Luftleere ist? Aufl.: 10383^{kg}. — A. 311. Wie groß, wenn anderseits der Luftdruck herrscht? Aufl.: 5191^{kg}. — A. 312. Welchen Druck hat ein Taucher in 100^m Tiefe auszuhalten? Aufl.: $150\,000^{kg}$. — A. 313. Wie groß ist der Druck auf 1^{qdm} bei einem Barometerstande von 80^{cm} Höhe? Aufl.: 109^{kg}. — A. 314. Wie hoch müßte eine Aethersäule sein, um bei 71^{cm} Bar. der Luft das Gleichgewicht zu halten? Aufl.: $13,6^m$. — A. 315. Wie viele At. beträgt der Druck auf den Kolben einer Wassersäulenmaschine, wenn das Wasser $51,74^m$ hoch steht? Aufl.: 5^{at}. — A. 316. Wie hoch würde die Luft sein, wenn ihre Dichte überall $^1/_{777}$ wäre? Aufl.: $76 \,.\, 13,59 / {}^1/_{777} = 8025^m$ = 1 Meile ca. — A. 317. Wie hoch muß man steigen, damit der Druck um 1^{mm} Quecksilber kleiner wird? Aufl.: $10,5^m$. — A. 318. Wie hoch würde die Atmosphäre sein, wenn ihre Schwere allein durch ihre Centrifugalkraft aufgehoben werden sollte? Anl.: Die Centrifugalbeschleunigung ist auf dem Aequator nach 141. $= v^2 / r = 464^2 / 6349200 = 0,03$. Der Punkt, wo Centrifugalkraft und Schwerkraft gleich sein sollen, sei x mal so weit entfernt; dann ist die Centrifugalbeschleunigung $x^2 / x = x$mal größer, $= 0,03\,x$; die Beschleunigung der Schwere ist dort $9,808 / x^2$; hieraus $0,03\,x = 9,808 / x^2$, woraus $x^3 = 327$, also $x =$ ca. 7; also ist in der Höhe von 6 Erdradien die Luft unmöglich (Laplace).

187 **Das Barometer.** Das Barometer ist ein Instrument zum Messen des Luftdruckes (βαρύς = schwer). Der Torricelli'sche Versuch bietet schon ein solches Instrument; doch ist dasselbe in dieser Form zu wenig handlich und hat daher zahlreichen Abänderungen weichen müssen, die indeß alle auf demselben Grundgedanken beruhen. Die so entstandenen Quecksilberbarometer sind entweder Gefäßbarometer, Heberbarometer oder Phiolenbarometer; die Metallbarometer haben einen anderen Grundgedanken.

Im gewöhnlichen Leben findet man am häufigsten das Phiolenbarometer; die Röhre desselben biegt sich unten um und erweitert sich in ein Gefäß von der Form einer kleinen Flasche oder Phiole, welche noch theilweise mit Quecksilber gefüllt ist. Der Luftdruck wird hier gemessen durch den Abstand des Spiegels in der Phiole von dem in der Röhre; da aber der erste Spiegel sich senken muß, wenn der letzte sich hebt, und umgekehrt, und da die Phiole gewöhnlich nicht so weit ist, daß man das Heben und Senken des Spiegels in derselben außer Acht lassen kann, so haben die Beobachtungen des Röhrenspiegels allein, ohne Rücksicht auf den Phiolenspiegel keinen wissenschaftlichen Werth; für das gewöhnliche Leben, für die ohnedies nicht zuverlässigen Wetteranzeigen aber sind sie ausreichend. Genauer schon können Gefäßbarometer sein.

Das Gefäßbarometer kommt nämlich der ursprünglichen Torricelli'schen Einrichtung am nächsten. Es besteht aus Röhre, Gefäß und Skale. Das Gefäß kann so weit genommen werden, daß das Fallen und Steigen in der Röhre höchstens ein unmerkliches Steigen und Fallen in dem Gefäße zur Folge hat, daß also die Skale fest mit dem Apparat verbunden sein kann und zwar so, daß der Anfangspunkt oder Nullpunkt der Skale mit dem Gefäßspiegel zusammenfällt. Die größte Genauigkeit hat Fortin (1820) in seinem Gefäßbarometer erreicht, das auch vortrefflich als Reisebarometer eingerichtet ist. Zu diesem Zwecke ist das Gefäß ganz verschlossen und nur beim Gebrauche wird durch eine Schraubenöffnung Luft gelassen. Der Boden des Gefäßes ist doppelt; der obere Boden besteht aus einem Lederbeutel, gegen welchen der Knopf einer durch den unteren Boden gehenden Schraube drückt; hierdurch kann der Spiegel im Gefäße bei jeder Beobachtung genau in den Nullpunkt der Skale gebracht werden. Dieser Punkt fällt nämlich zusammen mit der Spitze eines von

dem Gefäßdeckel herabragenden Elfenbeinstäbchens und ist erreicht, wenn diese Spitze und ihr Bild im Quecksilberspiegel gerade einander berühren. Hiermit ist die erste Hauptschwierigkeit bei Barometerbeobachtungen überwunden. Die zweite Schwierigkeit besteht in dem richtigen Ablesen der Höhe der Quecksilberkuppe in der Röhre. Um dieses richtige Ablesen möglich zu machen und zugleich die Röhre, welche quecksilberdicht durch eine geliderte Deckelöffnung des Gefäßes tief in das Quecksilber hinabgeht, zu schützen, ist die Röhre von einer an das Gefäß angeschlossenen Messinghülse umgeben, auf der die Skale eingegraben ist. In der Gegend der Kuppe hat die Hülse zwei sich gegenüberliegende Spalten, innerhalb deren durch Zahnstange und Rädchen ein zweifacher Nonius verschiebbar ist. Der vordere und hintere Rand der unteren Kante dieses Nonius müssen für das beobachtende Auge mit der Kuppe in eine Gerade fallen; dann deutet der Nullpunkt des Nonius gerade auf die abzulesende Stelle der Skale. An ihrem oberen Ende ist die Hülse durch eine Cardanische Aufhängung an einem cylindrischen Holzgehäuse befestigt, das den ganzen Apparat umschließt und sich in drei Theile zerlegen läßt, die beim Gebrauche als Füße zum Aufstellen dienen. So genau dieses Barometer auch ist, so leidet es doch daran, daß durch die Capillardepression das Quecksilber in der Röhre etwas tiefer steht, als es durch den Luftdruck stehen müßte. Für Röhren von 20mm Durchmesser und mehr ist dieser Fehler verschwindend klein; festen Barometern gibt man daher einen solchen Durchmesser. Bei Reisebarometern ist dies aber unmöglich; wenn nun auch soche Barometer hauptsächlich zu Höhenmessungen angewendet werden, wo immer zwei Beobachtungen vorkommen, bei deren Vergleichung der Fehler sich verkleinert, und wenn man auch mittels genau angefertigter Tabellen Correctionen anzubringen sucht, so bleibt doch das beste Gefäßbarometer hinter dem Heberbarometer darin zurück, daß bei dem letzteren die Depression wegfällt.

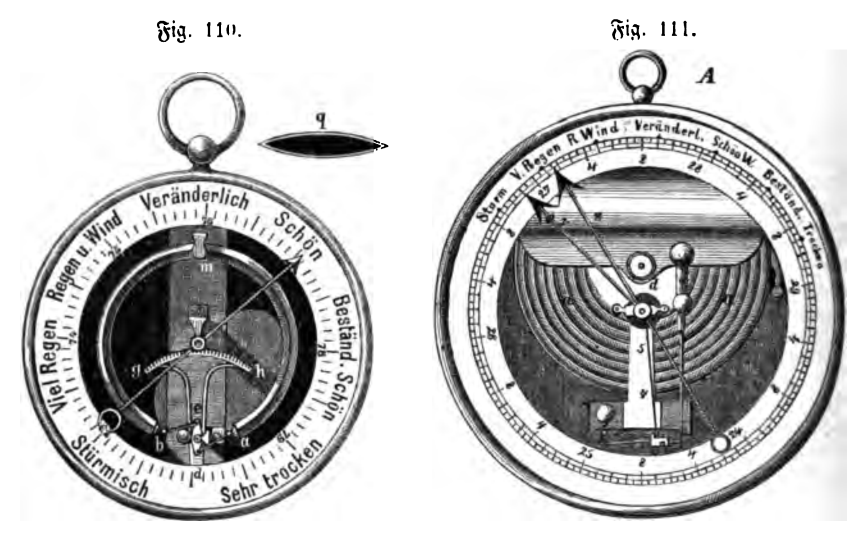
Das Heberbarometer besteht nämlich nur aus einer umgebogenen Röhre, deren längerer Schenkel geschlossen ist und die eigentliche Barometerröhre bildet, während der kürzere Schenkel offen bleibt und dem Luftdrucke Zugang gestattet. Hierdurch ist die Depression beiderseits gleich groß und hebt sich daher auf. Allein bei diesem Barometer steigt der eine Spiegel immer ebenso viel, als der andere sinkt; es ist daher der untere Spiegel nicht ein fester Anfangspunkt für die Ablesung, sondern ebenso veränderlich wie der obere. Es bietet demnach hier die genaue Ablesung Schwierigkeiten. Entweder muß man eine doppelte Ablesung, bei beiden Spiegeln, vornehmen, und die eine Zahl von der anderen subtrahiren, wodurch die bei der Ablesung möglichen Fehler sich verdoppeln können; oder man muß die Skale oder auch die Röhre durch Schrauben verschiebbar machen, und bei jeder Beobachtung so lange verschieben, bis der Nullpunkt an den unteren Spiegel kommt. Dieses Coincidiren des Spiegels mit dem Nullpunkte ist eben so gut eine Fehlerquelle wie eine Ablesung: daher sind beide Methoden ziemlich gleich. Indessen sind die Heberbarometer doch einer großen Genauigkeit fähig und sind sehr compendiös, also für Reisebeobachtungen sehr tauglich. Für diesen Zweck müssen sie noch Vorrichtungen zum Abschlusse des offenen Schenkels haben, welche sehr mannichfacher Art sind. Auch hat Geißler in Bonn von der Vollkommenheit der jetzigen Glasarbeiten eine Anwendung auf das Barometer gemacht, indem er dasselbe zusammenlegbar, also für Reisen besonders compendiös construirte, was jetzt von vielen Mechanikern ebenfalls ausgeführt wird.

Außer den in vorstehenden Beschreibungen angedeuteten Umständen, die bei der Anfertigung und dem Gebrauche der Barometer beobachtet werden müssen, wenn die Resultate auf Genauigkeit Anspruch erheben wollen, muß zu demselben Zwecke noch eine Reihe von Einflüssen im Auge behalten werden, die wir im Zusammenhange mit den schon besprochenen anführen: 1. das Quecksilber muß chemisch rein sein; von gröberen Unreinigkeiten wird es mittels Pressen durch Hirschleder, von feineren durch Waschen mit Salpetersäure und dann mit Wasser befreit. 2. Die Röhre muß überall gleich weit sein; zu dem Zwecke wird sie calibrirt, d. h. ein Quecksilbertropfen wird an verschiedene Stellen der Röhre gebracht. Hat er nicht überall gleiche Länge, so ist die Röhre unbrauchbar. 3. Die Röhre muß luft- und dampffrei sein; um dies zu erreichen, wird sie mit Quecksilber ausgekocht. Nach Untersuchungen von Morren (1865) ist es unmöglich, alle Luft und alle Dämpfe zu vertreiben und ist weder Quecksilber, noch die Röhrenwand luftfrei und daher das Vacuum niemals vollkommen; am vollkommensten ist es, wenn beim Neigen das Quecksilber mit hellem Klange gegen die Röhre stößt; ist der Klang dumpf geworden, so muß man das Auskochen wieder vornehmen. 4. Die Röhre darf nicht zu eng sein, weil sonst das Quecksilber schwer beweglich wird, und weil bei Gefäßbarometern die Unregelmäßigkeiten der Depression bei engeren Röhren größer werden. Vor Beobachtungen gewöhnlicher Barometer klopft man an das Gestell, um die Adhäsion aufzuheben. 5. Die Temperatur muß berücksichtigt werden; denn das Quecksilber dehnt sich für 1° C um $^1/_{5550}$ seines Volumens aus. Gewöhnlich reducirt man die Barometerstände auf 0°, muß also von dem beobachteten Stande so viele 5550tel abzählen, als Temperaturgrade stattfinden; bei großer Genauigkeit muß man auch auf die Veränderungen des Glases und der Skale durch die Wärme Rücksicht nehmen. 6. Bei Gefäß-

barometern muß man wegen der Depression 1mm für Röhren von 4—6mm Weite addiren, 0,5mm für Röhren von 4—10mm, 0,1mm für Röhren von 10—15mm. 7. **Bei der Ablesung des Standes muß das Auge in einer Horizontalen mit der Quecksilberkuppe sein; bei feineren Apparaten sind zu diesem Zwecke verschiebbare Mikroskope mit Fadenkreuzen angebracht.** 8. **Bei Gefäßbarometern muß der Gefäßspiegel mit dem Nullpunkte coincidiren.** 9. **Soll ein Barometer transportirt werden, so neigt man es, bis das Quecksilber an das Röhrenende stößt und trägt es in dieser Lage.** Wollte man es aufrecht tragen, so würde das Quecksilber so stark schwanken, daß Luftblasen eindringen könnten, wodurch das Barometer unbrauchbar würde. 10. Reisebarometer müssen einen sicheren Verschluß haben; der beste für Heberbarometer ist von Greiner in Berlin. 11. Schiffsbarometer müssen in Cardanischen Ringen hängen; doch sind für gewöhnliche Beobachtungen auf Schiffen die Metallbarometer vorzuziehen.

Das **Metallbarometer** oder **Aneroidbarometer** (*α* priv. und *νηρός* flüssig). Dieses Barometer ist zwar nicht so genau wie das Quecksilberbarometer, ist also nur dann zu wissenschaftlichen Zwecken brauchbar, wenn ihm zuverlässige Correctionstabellen beigegeben sind. Es ist aber besonders geeignet für Beobachtungen in polaren Gegenden, wo das Quecksilber gefriert; dann ist es sehr bequem zu transportiren und daher auch für Höhenmessungen in entlegenen Gegenden sehr tauglich. Endlich ist es nicht so leicht zerbrechlich wie das gewöhnliche Barometer aus Glas und Quecksilber, und paßt daher besser als Zimmerbarometer, wobei es auch einen Zimmerschmuck bildet. Man hat besonders zwei Arten von Metallbarometern: das Holosteric (*ὅλος* = ganz, *στερεός* = fest) von Vidi und das Metallic von Bourdon. Das **Metallic** (Fig. 110) besteht aus einem kreisbogenförmigen, luftleeren Messingringe amb von langem, linsenförmigen Querschnitte q; in der Mitte m ist derselbe an dem Gehäuse befestigt, sonst aber frei, und wirkt mit seinen beiden freien Enden a und b durch die Hebel ad und bc und den Zahnbogen dgh auf den Zeiger. Wird der Luftdruck

Fig. 110. Fig. 111.



größer, so erfährt die äußere Ringfläche eine größere Vermehrung des Druckes als die innere, weil die erstere größer ist als die letztere; folglich muß die Krümmung verstärkt werden, wodurch die freien Ringenden den Zeiger drehen. Das **Holosteric** (Fig. 111) besteht aus einer möglichst luftleeren, hermetisch geschlossenen Messingdose, deren äußerst dünner Deckel durch ringförmige Cannelirungen a sehr elastisch ist. Wenn der Luftdruck zu- oder abnimmt, so biegt sich dieser Boden einwärts oder auswärts; diese Bewegung wird durch einen complicirten Mechanismus auf einen langen Zeiger übertragen, der sich auf dem Umfange des kreisförmigen Gehäuses dreht, wo die Gradeintheilung angebracht ist. **Balfour** Stewart hat 1870 seine Vergleichungsversuche eines Aneroids mit einem Normalquecksilberbarometer bekannt gemacht; nach diesen, sowie nach den Meteorologencongressen in Wien und Leipzig (1872 und 73) ändern die Aneroide ihre Nullpunkte oft plötzlich und sind auch ihre Wärmecorrecturen unzuverlässig; besonders ungenau zeigten sich die Aneroide bei geringen Spannungen, so daß die Angaben bei 60cm Luftdruck unbrauchbar werden. **Wäre dieser Mangel nicht zu beseitigen, so würden die Aneroide für Höhenmessungen unbrauchbar sein.**



Das Wagbarometer von Morland (1680), welches den Luftdruck durch die Schwingungen eines Wagbalkens angibt, und der **Barograph** von Secchi (1858), der mittels desselben die Angaben des Barometers selbstthätig aufschreibt, sind in 611. aufzufinden.

Anwendung des Barometers. Die genaue Bestimmung des Luftdruckes ist bei vielen naturwissenschaftlichen Untersuchungen, z. B. zur Erforschung der Wetterverhältnisse der Erde, unbedingt nothwendig; daher ist dem Physiker das Barometer ein unentbehrliches Instrument. Außerdem wird dasselbe zu Höhenmessungen (s. 593.) und im gewöhnlichen Leben als Wetteranzeiger (s. 592.) verwendet.

188 **Die Ausdehnsamkeit der Luftarten.** Die Ausdehnsamkeit oder Expansibilität der Luftarten ist das Bestreben derselben, sich in jeden dargebotenen Raum auszubreiten. Das Vorhandensein dieser für die Luftarten charakteristischen und unterscheidenden Eigenschaft folgt schon aus der Definition der Luftarten, daß nämlich die Moleküle derselben eine lebhafte fortschreitende Bewegung besitzen; dann ist diese Eigenschaft nach dem fünften Axiom eine einfache Folge des Luftdruckes; die Luftarten besitzen keine Festigkeit, folglich müssen sie dem Luftdrucke eine gleiche Gegenkraft, eine ausdehnende Kraft entgensetzen; endlich kann die Ausdehnsamkeit durch zahlreiche Versuche nachgewiesen werden: Ist ein luftleerer abgeschlossener Raum in Verbindung mit einem lufterfüllten abgeschlossenen Raume, so strömt aus dem letzteren Raume Luft in den ersteren; liegt in einer Glasglocke eine zugebundene zusammengedrückte Blase, so dehnt sich dieselbe bis zum Zerspringen aus, wenn die Glasglocke luftleer gepumpt wird. Steigen in einem hohen mit Wasser gefüllten Gefäße Luftblasen auf, so werden dieselben immer größer, weil sie in den höheren Schichten einem geringeren Drucke ausgesetzt sind.

Vermöge der Ausdehnsamkeit übt jedes Gasvolumen, mag es eingeschlossen sein oder nicht, auf seine Grenzen wie im Inneren, einen Druck aus, den man Spannung, Elasticität oder Expansivkraft nennt. Die Größe der Expansivkraft ist, so lange das Gas mit der Luft in Verbindung steht, gleich dem Luftdrucke, also gleich einer Atmosphäre, gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76^{cm} Höhe; sie nimmt zu und ab wie der Luftdruck. Ebenso nimmt aber auch die Spannung einer eingeschlossenen Gasmasse zu, wenn der äußere Druck auf dieselbe größer wird, wenn sie also durch einen äußeren Druck auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt wird, wie besonders einfach die Knallbüchse der Knaben zeigt. Die Spannung oder Expansivkraft eines Gases nimmt zu, wenn das Volumen desselben kleiner wird; erklärlich ist dies nach der mechanischen Theorie der Gase (54.) dadurch, daß bei abnehmendem Volumen die Dichte des Gases wächst und demnach eine größere Anzahl von Gasmolekülen stoßend gegen die Grenzwände fliegt. Ob die Zunahme der Spannung in demselben Maße erfolgt wie die Abnahme des Volumens, muß eigens untersucht werden. Theoretisch haben wir diese Untersuchung schon in der „mechanischen Theorie der Gase" (54.) geführt; wir fanden dort, daß das Product pv der Spannung p mit dem Volumen v unter der Voraussetzung gleichbleibender Temperatur constant ist, daß also p in demselben Maße zunimmt, wie v abnimmt. Diese wichtige Eigenschaft der Gase wurde schon von Boyle (1662) entdeckt, von Mariotte (1679) bestätigt und veröffentlicht, von Arago und Dulong (1820) im Auftrage der französischen Akademie von Neuem untersucht und endlich von Regnault (1845) für möglichst viele Gase und Temperaturen erforscht, und mit später anzuführenden Beschränkungen bestätigt gefunden. Diese Wahrheit führt den Namen das Mariotte'sche Gesetz; dasselbe läßt sich in verschiedenen Gestalten aussprechen.

189 **Das Mariotte'sche Gesetz.** 1. Bei gleichbleibender Temperatur ist das Product aus der Spannung und dem Volumen einer bestimmten Gasmenge constant.

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = \text{Const.}$$

2. **Bei gleichbleibender Temperatur verhalten sich die Spannungen einer bestimmten Gasmenge umgekehrt wie die zugehörigen Volumina, oder die Spannung ist dem Volumen umgekehrt proportional.**

$$p_1 : p_2 = v_2 : v_1 \text{ oder } p_1 = \frac{p_2 v_2}{v_1} = \frac{\text{Const.}}{v_1}$$

Da die Dichte in demselben Verhältnisse zunimmt, wie das Volumen abnimmt, und umgekehrt, da also Dichte und Volumen einander umgekehrt proportional sind, so kann statt des Volumens die Dichte im umgekehrten Verhalten eingeführt werden und daher das Gesetz auch folgende Gestalten annehmen:

3. **Bei gleichbleibender Temperatur verhalten sich die Spannungen eines Gases direct wie die Dichten desselben, oder die Spannung ist der Dichte direct proportional.**

$$p_1 : p_2 = d_1 : d_2 \text{ oder } p_1 = \frac{p_2}{d_2} d_1 = \text{Const. } d_1.$$

4. **Bei gleichbleibender Temperatur ist der Quotient aus der Spannung durch die Dichte eines Gases constant.**

$$p_1 / d_1 = p_2 / d_2 = \text{Const.}$$

Die Spannung ist immer gleich dem äußeren Drucke; das Gesetz könnte daher auch für den äußeren Druck in den verschiedenen Gestalten ausgesprochen werden. Ueberhaupt treten in dem Gesetze 4 Größen: äußerer Druck, Spannung, Dichte und Volumen auf; daher sind die möglichen Formen des Gesetzes, deren Aussprache dem Schüler empfohlen wird, noch sehr mannichfaltig; die einfachste und vollständigste Form ist die, daß äußerer Druck, Spannung und Dichte einander direct und dem Volumen umgekehrt proportional sind.

Weil die Versuche von Mariotte leicht anzustellen sind, so wollen wir das Gesetz mittels derselben nachweisen. Für verdichtete Gase benutzt man eine umgebogene Glasröhre mit einem kürzeren geschlossenen und einem möglichst langen offenen Schenkel, die auf einem Gestelle befestigt und mit einer Skale an jedem Schenkel versehen ist. Man bringt zuerst soviel Quecksilber in die Röhre, daß es in beiden Schenkeln bis an den Nullpunkt reicht. In dem geschlossenen Schenkel ist dann Luft von der Spannung der Atmosphäre, weil sie nur dem Drucke derselben ausgesetzt ist. Füllt man nun soviel Quecksilber zu, daß es in dem offenen Schenkel 76^{cm}, 2.76^{cm}, 3.76^{cm} u. s. w. höher steht als in dem geschlossenen, so nimmt in dem letzteren die Luft nur einen 2, 3, 4 u. s. w. mal kleineren Raum ein als vorher, womit das Gesetz für diese Pressungen nachgewiesen ist. Denn z. B. bei 3.76^{cm} Quecksilber hat die abgeschlossene Luft einen Druck von 4^{at} zu erleiden; der Versuch zeigt, daß sie dann wirklich einen 4 mal kleineren Raum einnimmt; außerdem muß die innere Spannung auch 4 mal größer sein, da sie ja 4 mal so viel zu tragen vermag als vorher, während auch ihre Dichte 4 mal größer geworden ist. — Für verdünnte Gase bedarf man eines weiten, hohen, mit Quecksilber gefüllten Glasgefäßes und einer calibrirten, graduirten, mit einem Hahne verschließbaren Glasröhre. Man taucht zuerst die Röhre, den Hahn oben und offen, in das Quecksilber, bis dasselbe bei einem beliebigen Theilstriche, innen und außen gleich hoch, steht. Dann schließt man den Hahn und hat dadurch eine abgeschlossene Luftmenge von der Spannung der Atmosphäre. Zieht man die Röhre nun aus dem Quecksilber, so hoch, daß die abgesperrte Luft den doppelten Raum einnimmt, so wird das Quecksilber in der Röhre auch $\frac{1}{2} . 76 = 38^{cm}$ gestiegen sein. Folglich hat die abgesperrte Luft nur noch die halbe Spannung wie vorher, womit das Gesetz auch für diesen Fall nachgewiesen ist. Denn der Druck in der Röhre muß dem äußeren Luftdrucke gleich sein; da aber innen 38^{cm} Quecksilber stehen, so muß die abgesperrte Luft ebenfalls eine Spannung von $38^{cm} = \frac{1}{2}^{at}$ ausüben.

Durch solche Versuche ist das Gesetz nur für geringe Pressungen nachgewiesen. Arago und Dulong dehnten ihre Versuche bis zu 27^{at} aus, ohne Abweichungen von dem Gesetze für die Luft zu finden. Natterer ging gar bis zu 2700^{at} und fand, daß bei solchen hohen Pressungen das Gesetz selbst für die permanenten Gase nicht mehr gilt. Für leicht coërcible gilt das Gesetz schon bei $3—4^{at}$ nicht mehr, woraus man schloß, daß für alle Gase die Abweichungen von dem Gesetze um so größer seien, je näher sie dem flüssigen Zustande kommen. Erst Regnaults ausgezeichnete Versuche stellten fest, daß auch für permanente Gase selbst bei kleinen Pressungen das Mariotte'sche Gesetz nur eine, wenn auch sehr starke, Annäherung an

die Wahrheit ist, und zwar, daß atmosphärische Luft und Stickstoff etwas stärker zusammendrückbar sind, als es nach dem Gesetze sein sollte, gerade wie es bei Kohlendioxyd und mit den von Pouillet und Despretz untersuchten Gasen Ammoniak, Cyan, Schwefeldioxyd u. s. w. der Fall ist, daß aber der Wasserstoff, auf der anderen Seite allein stehend, nach der entgegengesetzten Seite abweicht, nämlich weniger zusammendrückbar ist, als es das Gesetz verlangt.

Das Gesetz darf nicht etwa so mißverstanden werden, als ob verschiedene Gase von gleicher Dichte auch gleiche Spannung hätten; vielmehr findet das gerade Gegentheil statt; verschiedene Gase von verschiedener Dichte haben dieselbe Spannung, wenn sie nur unter gleichem Drucke stehen; ein Volumen Wasserstoff, das unter dem Luftdrucke steht, hat dieselbe Spannung wie dasselbe Volumen atm. Luft, obwohl das letztere 14 mal so schwer ist als das erstere. Da nun, wie schon früher erwähnt, in gleichen Gasvolumen gleich viele Moleküle enthalten sind, so müssen die leichteren Moleküle eine größere Geschwindigkeit haben, um denselben Druck ausüben zu können, wie gleich viele Moleküle von größerer Masse; ein Schluß, zu dem wir schon früher gelangt sind.

Die Ausdehnsamkeit und die Spannung der Gase stehen noch in wesentlichem Zusammenhange mit der Temperatur, den wir in der Lehre von der Wärme noch näher zu betrachten haben. Hier ist nur zu bemerken, daß das Mariotte'sche Gesetz demgemäß nur unter der Voraussetzung unveränderter Temperatur gilt. Außerdem haben Regnaults Versuche den Schluß erlaubt, daß bei höherer Temperatur alle Gase dem Mariotte'schen Gesetze genauer gehorchen, und zwar um so genauer, je näher sie einer gewissen Grenz-Temperatur kommen. Es gilt demnach das Mariotte'sche Gesetz für jedes Gas mathematisch genau nur bei einer ganz bestimmten, noch unbekannten Temperatur; über dieselbe hinaus erhitzt, entfernen sich die Gase wieder mehr von dem Gesetze.

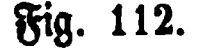
190 **Aufg.** 319. Welchen Raum nimmt 1^{cbm} Luft bei 267^{mm} und bei 1000^{mm} Barometerstand ein? Aufl.: $2{,}85^{cbm}$, $0{,}76^{cbm}$. — A. 320. Was wiegt 1^{cbm} Luft bei 300^{cm} und bei 950^{mm} Barometerstand, wenn er bei 760^{mm} 1293^{g} wiegt? Aufl.: 5104^{g}, 1616^{g}. — A. 321. Um wieviel muß man bei 500^{mm} Barometerstand steigen, damit das Quecksilber um 1^{mm} sinke? Aufl.: $15{,}97^{m}$. — A. 322. Welcher Barometerstand herrscht in der Höhe, in welcher man 21^{m} steigen muß, damit das Quecksilber um 1^{mm} sinke? Aufl.: 380^{mm}. — A. 323. Wie hoch muß in dem offenen Schenkel des Mariotte'schen Apparates für verdichtete Luft das Quecksilber stehen, wenn es in dem geschlossenen, in 12^{cm} getheilten, Schenkel von 0 auf 7 gestiegen ist? Aufl.: 1824^{mm} über dem Grad 7. — A. 324. Zu welchem Grade ist das Quecksilber im geschlossenen Schenkel gestiegen, wenn man soviel Quecksilber zugegossen hat, daß es im offenen Schenkel 100^{cm} höher steht? Aufl.: $(76 + 100 - x) : 76 = 12 : (12 - x)$, woraus $x = 6{,}6^{cm}$. — A. 325. Wie hoch muß in der aufgezogenen Röhre des Mariotte'schen Apparates für verdünnte Luft das Quecksilber steigen, wenn die Luft einen 3 mal größeren Raum einnimmt? Aufl.: $50^{2}/_{3}{}^{cm}$. — A. 326. Wie hat sich der Luftraum vermehrt, wenn das Quecksilber 19^{cm} stieg? Aufl.: Um $^{1}/_{3}$. — A. 327. Wenn man bei dem bekannten Versuche über die Undurchdringlichkeit der Luft ein umgestülptes Glas 40^{cm} tief unter Wasser drückt, welchen Raum nimmt dann die Luft noch ein? Aufl.: 0,96 des ursprünglichen. — A. 328. Mit welcher Kraft wird das losgelassene Glas nach oben getrieben (abgesehen vom Auftriebe des Wassers)? Aufl.: $0{,}043^{kg}$ per qcm. — A. 329. Mit welcher Kraft, den Auftrieb mit gerechnet? Aufl.: $0{,}083^{kg}$. — A. 330. Ein cdm Wasserstoff von 0,07 sp. Gew. strömt in einen luftleeren Raum von 3^{cdm} ein; wie groß ist nachher das sp. Gew.? Aufl.: 0,0175. — A. 331. In einem in Quecksilber tauchenden, umgestülpten Glascylinder steht das Quecksilber 6^{cm} tiefer als außerhalb; wie groß ist das sp. Gew. des eingeschlossenen Chlors? Aufl.: $2{,}44 \cdot {}^{82}/_{76} = 2{,}65$.

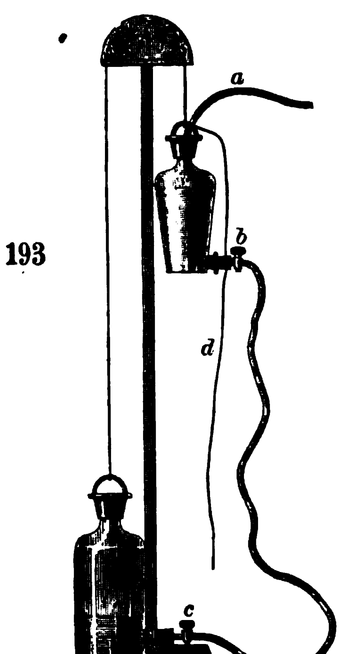
1. Anwendung des Luftdruckes und des Mariotte'schen Gesetzes.

191 **Die Ventile.** Die Ventile sind Vorrichtungen, um hohle Räume abwechselnd zu öffnen und zu schließen. Sie sind entweder Klappenventile, Kegelventile, Kugelventile oder Blasenventile. Bei den ersteren ist eine um ein seitlich liegendes Gelenke drehbare Metall- oder Lederplatte über eine Oeffnung des Hohlraumes gelegt; bei dem zweiten und dritten ist die Wand rings um die Oeffnung kegel- oder kugelförmig ausgehöhlt, und in diese Höhlung ist ein anschließender kegel- oder kugelförmiger Metallkörper eingesenkt; bei dem letzten ist über die Oeffnung eine Haut gespannt und an dem aufliegenden Theile entweder durchlöchert oder nur theilweise befestigt. Wird nun über einem der genannten Ventile die Luft verdünnt, so wird die Spannung derselben nach dem Mariotte'schen Gesetze geringer als der Luftdruck, der im Inneren des Gefäßes herrscht; dieser hebt daher die Ventile, wodurch der Luft das Ausströmen möglich ist; wenn dagegen die Luft unter den Ventilen verdünnt wird, so werden die Ventile durch den äußeren Luftdruck fest gegen die Oeffnung gepreßt, und diese wird dann luftdicht geschlossen. Zu demselben Zwecke kann auch die

Spannung der Luft verwendet werden; wenn z. B. die Luft über den Ventilen verdichtet wird, so ist ihre Spannung größer als der unter denselben vorhandene Luftdruck, die Ventile werden also geschlossen; umgekehrt müssen sie sich öffnen, wenn die innere Luft verdichtet wird, also durch ihre Spannung den äußeren Luftdruck überwindet. Die Ventile haben den Hähnen gegenüber den Vorzug, daß sie selbstthätig sind, d. h. durch die Vorgänge innerhalb des Apparates sich selbst nach Bedürfniß öffnen und schließen, während die Hähne entweder der Hand oder eines Mechanismus bedürfen.

192 **Das Saugen und die Pipette.** Bei dem Saugen und Trinken erweitern wir die Lungen, daher wird die Luft in den Lungen wie in dem mit den Lippen gefaßten Sauggefäße, Saugröhre, Pipette (eine mit kugeliger Anschwellung versehene Saugröhre) verdünnt; es überwiegt alsdann der Luftdruck die innere Spannung und drückt die Flüssigkeit, in welche das Sauggefäß getaucht ist, in dasselbe hinein. Verschließt man schnell die Saugöffnung mit dem Finger, so kann man die Pipette vollgefüllt aus der Flüssigkeit ziehen, ohne daß dieselbe herausläuft. Ein künstliches Saugen findet in dem **Aspirator** statt; die ältere Form desselben war einfach eine Flasche mit einem Ausflußhahn am Boden und einer Stöpselröhre; floß aus der gefüllten Flasche das Wasser nach dem Oeffnen des Hahnes aus, so mußte die Luft oder das Gas in den Gefäßen, zu welchen die Stöpselröhre führte, in die Flasche strömen, wurde also aus oder durch jene Gefäße gesaugt. Der neue Aspirator (Fig. 112) besteht aus 2 Flaschen mit Bodentubulus, die untere offen, die obere geschlossen und mit einer Stöpselsaugröhre a versehen. Werden die Hähne b und c geöffnet, so fließt das Wasser durch den Schlauch bc in die untere Flasche und saugt so aus der Röhre a Gas oder Luft in die obere Flasche. Ist die obere Flasche wasserleer, so zieht man sie mittels des Seiles d herab, die untere Flasche kommt hinauf, und kann durch Einsetzen des Stöpsels jetzt die Stelle der oberen übernehmen u. s. w. Ist die untere Flasche ebenfalls geschlossen und mit einem Ausblaserohre versehen, so kann sie, falls das Gestell einige Höhe besitzt, zum Blasen benutzt werden.


Fig. 112.



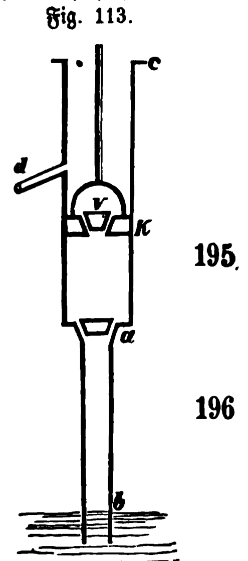
193 **Der Stechheber.** Derselbe besteht aus einer weiten, unten sich verengernden Röhre, die, in eine Flüssigkeit eingetaucht, sich als communicirendes Gefäß füllt. Wird sodann die obere Oeffnung geschlossen, so kann man den Heber, wie die Pipette, aus der Flüssigkeit nehmen, ohne daß solche herausfließt, vorausgesetzt, daß die untere Oeffnung ein gegenseitiges Ausweichen von Luft und Wasser nicht gestattet. Denn würde etwas ausfließen, so müßte oben ein luftleerer oder luftverdünnter Raum entstehen, so daß der äußere Luftdruck die Flüssigkeit in denselben heben würde. Die **Zaubertrichter** und **Zauberkannen** enthalten stechheberartige Hohlräume, deren obere Oeffnungen versteckt liegen, so daß durch unvermerktes Schließen und Oeffnen derselben das Fließen bald aufhört, bald wieder beginnt. Auch aus der **Sturzflasche** der alten Studirlampen kann das Oel nur fließen, wenn die Oeffnung nicht mehr in Oel taucht und daher die Luft in die Sturzflasche steigen kann. Bei dem Füllen der **Moderateur-Lampen** steht das Oel über einem ringsum fest an den Gefäßwänden liegenden Lederkreise; wird derselbe durch das Anziehen der daran befestigten Feder gehoben, so entsteht unter ihm ein leerer Raum, der äußere Luftdruck biegt alsdann den Lederkreis so nach unten, daß ringsum Raum frei wird, durch welchen das Oel unter das Leder fließt; der Druck der Feder auf das Leder treibt dann beim Brennen das Oel durch eine lange Röhre in den Docht.

194 **Der Schenkelheber.** Der Schenkelheber ist eine gekrümmte Röhre, deren einer Schenkel in eine Flüssigkeit taucht, während an der Oeffnung des anderen Schenkels gesaugt wird. Es fließt alsdann die Flüssigkeit so lange aus, als die Oeffnung des äußeren Schenkels unter dem Flüssigkeitsspiegel im Gefäße liegt. Das Anlassen erklärt sich wie beim Saugen; um das Fortfließen zu erklären, fassen wir die an der höchsten Stelle wirkenden Kräfte ins Auge; denn an dieser wagrechten Stelle kann nur dann ein fortdauerndes Fließen stattfinden, wenn nach einer Richtung überwiegende Kräfte wirken. Sowohl auf

den Wasserspiegel im Inneren als auf die äußere Oeffnung wirkt der Luftdruck $= 10^m$ Wasser, und pflanzt sich von beiden Seiten her von unten nach oben an die höchste Stelle fort. Derselbe erfährt aber beiderseits eine Verminderung und zwar durch den hydrostatischen Druck der in den Schenkeln befindlichen Wassersäulen. Von innen nach außen wirkt entgegen die Wassersäule von dem Wasserspiegel an bis zur höchsten Stelle, deren Höhe wir mit x bezeichnen, von außen nach innen die Wassersäule von der Oeffnung bis zur höchsten Stelle, deren Höhe $= y$ sein möge; folglich ist der Druck von innen nach außen $= 10 - x$, von außen nach innen $= 10 - y$. Durch den ersten Druck kann das Fließen nach außen stattfinden, wenn derselbe größer ist als der zweite, wenn also x kleiner ist als y, d. h. wenn der Wasserspiegel höher liegt als die äußere Oeffnung. Das allmälige Kleinerwerden des nach außen wirkenden Ueberdruckes bei dem Sinken des Wasserspiegels zeigt sich sehr deutlich an dem Dünnerwerden des Ausflußstrahles; bricht derselbe endlich ab, so kann man ihn durch rasches Neigen des Hebers nach außen wieder hervorrufen, während durch Neigen nach innen ein sofortiges Zurücksteigen des Wassers stattfindet, weil dann y kleiner als x, also der Druck von außen größer ist als der von innen. Wäre $x = 10^m$, so wäre der Druck von innen $= 0$, also das Fließen unmöglich; ein Heber darf nicht höher als 10^m sein.

Durch den Heber erklärt sich der Vexirbecher; derselbe enthält einen versteckten Schenkelheber, dessen innere Mündung am inneren Boden des Bechers steht, während die äußere in die äußere Bodenfläche fällt; wird der Becher bis zur Höhe des Heberknies gefüllt, so fließt derselbe ganz aus. Ganz ähnlich sind in der Natur die intermittirenden Quellen eingerichtet: eine durch Sickerwasser sich allmälig füllende Erdhöhle steht durch einen knieförmig nach oben gebogenen Kanal mit der Erdoberfläche in Verbindung; ist die Höhle bis zur Höhe des Knies gefüllt, so fließt die Quelle, und zwar so lange, bis die Höhle geleert ist; dann sistirt sie, bis die Höhle wieder gefüllt ist. In ähnlicher Weise sucht man durch Heberkanäle es zu verhindern, daß in Kanälen das Wasser über ein gewisses Niveau steigt. Vielleicht wirkt das Princip des Hebers auch bei intermittirenden Seen, wie z. B. am Zirknitzer See mit; nicht ins Spiel tritt dasselbe 1. bei dem künstlichen intermittirenden Brunnen der physikalischen Cabinete, welcher auf der schon betrachteten Erscheinung beruht, daß der Ausfluß aufhört, wenn der Luftzutritt über den Wasserspiegel abgesperrt ist; 2. bei dem Geiser, welcher auf der Spannung des Dampfes beruht. — Auch die Spielerei der fraterna caritas und der Heberspringbrunnen sind Anwendungen des Hebers; den Giftheber kann man ansaugen, ohne die Flüssigkeit zu berühren, und den Doppelheber kann man sogar anlassen, ohne anzusaugen.

Fig. 113.



195

Die Handspritze besteht aus einer Röhre, in welcher ein Kolben luftdicht durch einen Griff auf und ab geschoben werden kann. Wird die Röhre mit der an dem Boden befindlichen engen Oeffnung in Flüssigkeit gesteckt, so steigt dieselbe bei dem Aufziehen des Kolbens. Schiebt man dann den Kolben nieder, so wird die Luft zwischen demselben und der Flüssigkeit verdichtet; ihre Spannung wächst und treibt die Flüssigkeit durch die enge Oeffnung hinaus.

196

Die Saugpumpe. Die Hauptbestandtheile einer Saugpumpe (Fig. 113) sind: die ins Wasser reichende Saugröhre ab mit dem sich nach oben öffnenden Saugventil a, der luftdicht mit der Saugröhre verbundene Stiefel ac mit dem Ausflußrohre d, und der durch den Pumpenschwengel auf und ab zu schiebende Kolben k mit dem sich ebenfalls nach oben öffnenden Kolbenventil v. Wird der Kolben aufwärts gezogen, so wird die Luft zwischen demselben und dem Saugventil verdünnt, das Kolbenventil muß sich schließen, das Saugventil muß sich öffnen und die Luft in der Saugröhre muß sich dann ebenfalls verdünnen. Folglich ist der äußere Luftdruck größer als die Spannung der inneren Luft und treibt das Wasser in der Saugröhre aufwärts. Durch öftere Wiederholung des Spieles gelangt das Wasser über das

Saugventil a und dann über das Kolbenventil v, wonach es durch den Arm d ausfließt. Da der Luftdruck nur einer Wassersäule von 10^m Höhe das Gleichgewicht halten kann, so darf sich der Kolben nicht weiter als 10^m von dem Wasserspiegel entfernen. Als man 1643 in Florenz eine höhere Pumpe erfolglos anwandte, gelangte Torricelli zu der Entdeckung des Luftdruckes, während man vorher das Steigen des Wassers in der Saugröhre als eine Folge des horror vacui, einer Abneigung der Natur vor dem leeren Raume erklärt hatte.

Fig. 114.

197 **Die Druckpumpe.** Die Druckpumpe enthält wie die Saugpumpe eine Saugröhre ab (Fig. 114), ein Saugventil a, Stiefel ac, Kolben k; aber der Kolben ist nicht durchbrochen und enthält nicht ein Ventil wie bei der Saugpumpe, sondern über dem Saugventil a zweigt sich seitlich das sogenannte Steigrohr vd ab, das weiter oben das Ausflußrohr d trägt. Durch den Kolbenhub findet auch hier wieder Luftverdünnung und Emporsteigen des Wassers in das Saugrohr statt. Bei dem Kolbenschube aber, wo sich das Ventil a schließt, öffnet sich das Druckventil v, und es strömt anfänglich Luft und später Wasser in das Steigrohr. Soll dasselbe in dem Steigrohre sich hoch erheben, so muß dies durch einen Druck des Kolbens geschehen, ebenso wie in der Saugpumpe an der Kolbenstange eine größere Zugkraft wirken muß, wenn das Ausflußrohr mehr als 10^m von dem Wasserspiegel entfernt ist.

198 **Die Rotationspumpen** (Ramelli 1588) und **die Centrifugalpumpe** (Papin 1688). Rotationspumpen werden jetzt vielfach angewendet z. B. zur Beförderung von Wein aus einem Keller in einen andern oder auf die Straße; sie sind aus der alten „Kapselkunst" hervorgegangen; Ramellis „arteficiose Maschine" ist in Fig. 115 nach Reuleaux' Kinematik dargestellt. In dem Gehäuse oder der Kapsel a dreht sich eine Welle b und die Trommel d, jedoch nicht um die Achse der cylindrischen Kapsel. In die Trommel sind lose 4 Kolbenschleifen c eingesetzt, die z. B. durch Federn immer an die Kapselwand angedrückt werden. Durch die Rotation wird der Raum hinter dem c links unten immer größer und saugt daher Luft und Wasser an, während der Raum unter dem 4. c rechts oben kleiner wird und daher Luft und Wasser austreibt. Auch die Pumpen mit doppelter Rotation, die in neuerer Zeit vielfach verwendet werden, sind aus einer alten Erfindung, Pappenheims Kapselrad (Fig. 116) hervorgegangen, das schon in Kaspar Schotts Hydraulica, Mainz 1657, als ein gebrauchtes Werk beschrieben wird. Da die Zähne unten auseinander gehen, so vergrößern sie den Raum, saugen an, und führen durch die Zahnlücken Luft und dann Wasser nach oben. — Viel energischer als die Kapselkünste und ihre modernen Umformungen wirkt die Centrifugalpumpe; sie hat auch wie jene weder Ventile noch Kolben, aber den Vorzug, daß ihre Theile nicht „schlüssig" sein müssen, daß sie also auch für unreine Flüssigkeiten brauchbar ist. Das Saugrohr ab (Fig. 117) theilt sich bei a in 2 sanft abgebogene Aeste ai, die das Wasser nach dem centralen Raume i der Kapsel df führen. In dieser dreht sich sehr rasch ein Flügelrad und treibt Luft und Wasser durch ihre Centrifugalkraft in das Steigrohr fc. — Es gibt

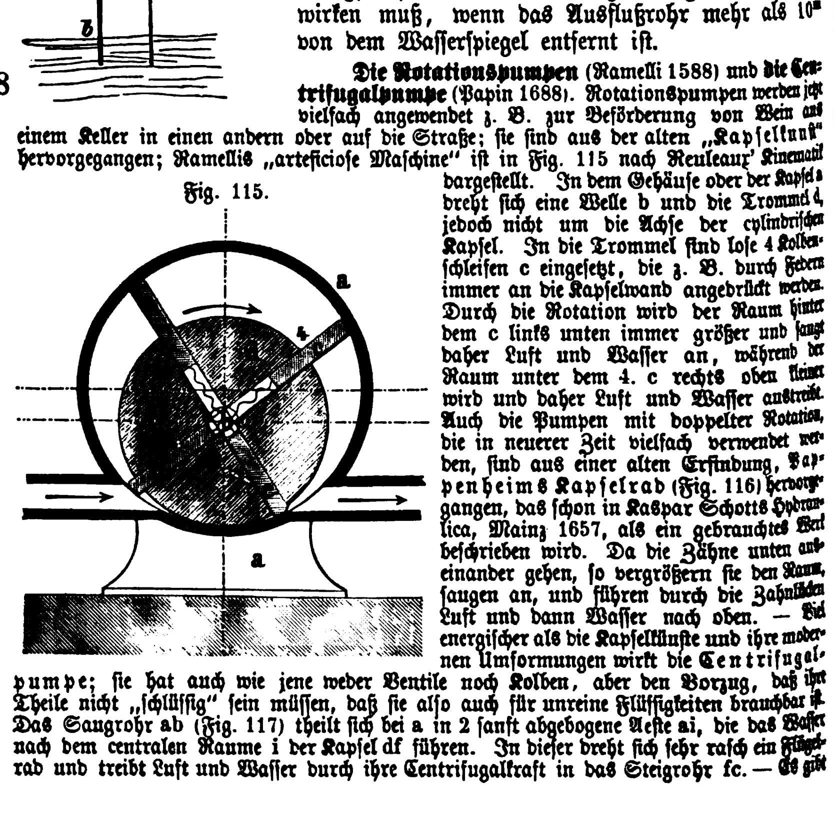


Fig. 115.

auch vielerlei Wasserbeförderungsmaschinen, die nicht auf dem Luftdrucke beruhen, wie die Schöpf-, Wurf- und Schneckenräder, die Paternosterwerke, die Archimedische Schraube u. s. w.

199 **Der Pulsometer** (Henry Hall 1870) wirkt durch Dampf; der Dampf bewirkt die Luftverdünnung und so das Ansaugen; er drückt aber auch durch seine Spannung die Flüssigkeit im Steigrohre hinauf z. B. Wasser 60m hoch, wenn er eine Spannung von 6at besitzt. Durch die obere Oeffnung (Fig. 118) tritt der Dampf ein, an die untere bei D ist das Saugrohr, an die hintere, punktirt angedeutete, das Steigrohr befestigt. Der Pulsometer besteht aus 2 flaschenförmigen Kammern A, deren enge Hälse sich bei S vereinigen und den Dampfkanal bilden; in diesem kann ein Kugelventil abwechselnd die beiden Flaschenhälse schließen und öffnen. Ebenso können die unteren Enden der Kammern durch 2 Kugelsaugventile abwechselnd mit dem Saugrohr verbunden und ebenso durch ein Kugeldruckventil h abwechselnd mit dem Steigrohr in Verbindung gesetzt werden.

Fig. 116.

Bei der Stellung in der Fig. ist der Raum links mit Wasser gefüllt und in Verbindung mit dem Dampfrohr; der Dampf drückt daher auf das Wasser, schließt hierdurch das linke Saugventil über D, schiebt das Druckventil h nach rechts und treibt so das Wasser in das Steigrohr. Die Kammer rechts aber steht mit dem Saugrohr in Verbindung, das Wasser steigt in demselben, condensirt den Dampf, steigt dadurch noch mehr und treibt die Dampfventilkugel nach links. Jetzt findet dort Condensation statt, indem das Wasser links nicht total ausgetrieben und der Dampf daher bei A mit einer breiten Wasserfläche in Berührung ist; durch diese Condensation entsteht ein luftverdünnter Raum, der äußere Luftdruck treibt das Wasser im Steigrohr aufwärts, hebt das linke Saugventil, wodurch das Wasser links steigt, während rechts der Dampf durch seinen Druck auf das Wasser das rechte Saugventil schließt und das Druckventil nach links schiebt, so daß jetzt rechts das Wasser ins Steigrohr getrieben wird u. s. w. So interessant dieser Apparat auch ist, so schwierig ist seine Anwendung; das Ingangsetzen ist complicirt, Störungen im Gange kommen oft vor, der Dampfverbrauch ist groß; man sucht einige dieser Nachtheile durch Verbesserungen zu beseitigen, die jedoch die Einfachheit der obigen ursprünglichen Construction wesentlich alteriren.

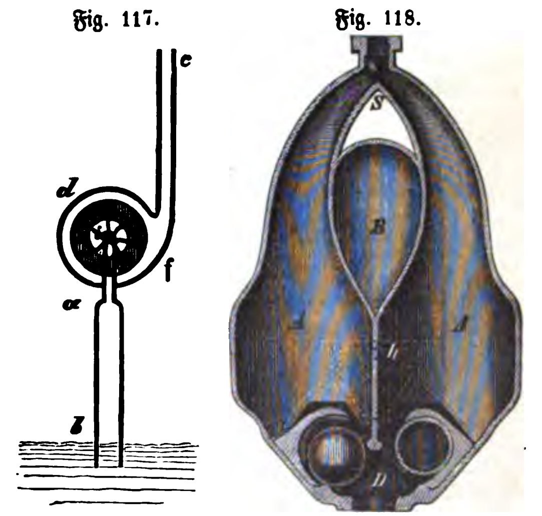


Fig. 117. Fig. 118.

200 **Die Quecksilberluftpumpe** von Geißler (1855) ist ein Apparat, mittels dessen man in kleineren Gefäßen den höchsten Grad der Luftverdünnung, der an wahre Luftleere grenzt, erreichen kann, während die Leistungen der gewöhnlichen Luftpumpen weit von der Luftleere entfernt bleiben. Geißler construirte dieselbe zu dem Zwecke, die berühmten Geißler'schen Röhren luftleer zu machen und mit verdünnten Gasen zu erfüllen, wodurch dieselben dem elektrischen Funkenstrome mit prächtigen Lichterscheinungen den Durchgang gestatten. Die Quecksilberluftpumpe besteht fast ganz aus Quecksilber und Glas, und verdankt daher nur der großen Geschicklichkeit der jetzigen Glasbläser ihr Dasein. Sie beruht auf dem Grundgedanken des Torricelli'schen Versuches. Eine Barometerröhre ab bildet mit dem Gefäße ac (Fig. 119) ein Ganzes und steht durch den Gummischlauch bd mit dem oben offenen Gefäß de in Verbindung. Der doppelt durchbohrte Hahn h bringt das Gefäß ac bald mit der Geißler'schen Röhre G, welche leer zu pumpen ist, bald mit dem offenen Gefäß i in

Verbindung, oder schließt dasselbe ganz ab. Ist das letztere der Fall und biegt man das Gefäß de ganz herab, so muß das Quecksilber in ac fallen, ac muß luftleer werden, weil ab etwa 80^{cm} hoch ist. Wird nun G mit ac in Verbindung gebracht, so wird die Luft in G verdünnt, wenn endlich das Gefäß de wieder gehoben wird, während ac von der Geißler'schen Röhre abgeschlossen, aber mit i verbunden ist, so steigt das Quecksilber wieder in die frühere Lage herauf, füllt ac ganz aus und treibt die Luft durch i hinaus. Durch öftere Wiederholung dieses Spieles wird endlich G nahezu luftleer. Das Gefäß s dient zum Reinigen der Luft, o zum Herbeiführen einer fremden Gasart, m ist eine Barometerprobe zum Messen der Verdünnung. Diese älteste Einrichtung der Quecksilberluftpumpe, mit welcher Geißler z. B. auf der Gießener Naturforscherversammlung (1864) arbeitete, hat zahlreiche Veränderungen und Verbesserungen erfahren, besonders von Morren, Jolly und Poggendorff. Geißler hatte auf der Pariser Industrie-Ausstellung (1867) Röhren ausgestellt, die so leer waren, daß der elektrische Funke eines riesigen Inductors von Ruhmkorff selbst in einem Abstande der zwei Platinspitzen von 1^{mm} nicht mehr überzuspringen vermochte.

201 **Mariottes Flasche.** Geht in eine gefüllte Flasche luftdicht durch den Kork eine Röhre bis zu einer gewissen Tiefe ad (Fig. 120), so wirkt in der ganzen horizontalen

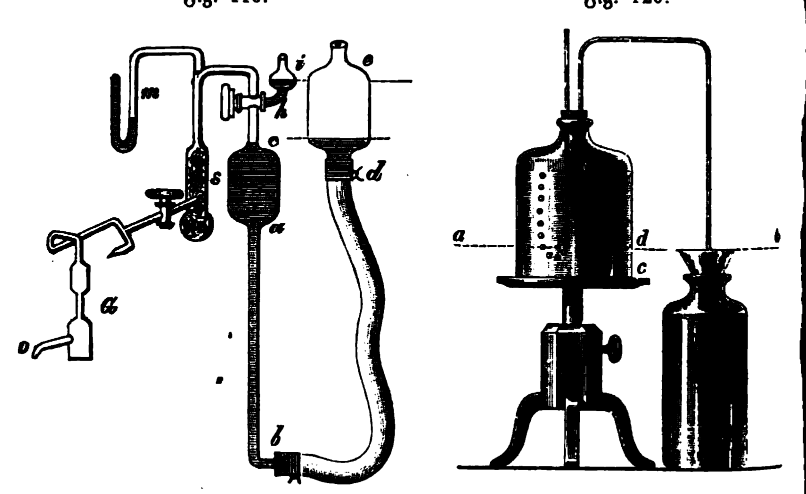


Fig. 119. Fig. 120.

Ebene ad, welche durch die Mündung der Röhre geht, der Luftdruck nach unten und nach oben; der Luftdruck nach oben wird durch den Druck des Wassers zwischen ad und dem Spiegel und durch den Druck der verdünnten Luft über dem Spiegel aufgehoben, wenn bei c Wasser ausfließt; umgekehrt wird aber auch der Druck des Wassers bis ad durch den Luftdruck nach oben aufgehoben; also ist in ad nur Luftdruck nach unten wirksam; dieser pflanzt sich bis zur Oeffnung c fort und ist dort noch vergrößert durch das Gewicht des Wassers zwischen ad und c, wird aber hier aufgehoben durch den äußeren Luftdruck bei der Oeffnung c. Es fließt daher das Wasser nur durch die Druckhöhe dc zwischen der Mündung der Röhre und der Oeffnung aus; dieser Druck bleibt aber immer derselbe, so lange noch Wasser über der Höhe der Mündung steht; daher ist eine solche Flasche, Mariotte'sche Flasche, nach ihrem Erfinder benannt, zu Versuchen über die Ausflußgeschwindigkeit geeignet. Eine nützliche Anwendung hat dieselbe in dem beständigen Filter (Fig. 120), in welchem die Ausflußöffnung c durch einen Schenkelheber ersetzt ist, dessen äußere Oeffnung etwas unter ab in einen Filtertrichter geht; ist das Wasser bis ab in das Filter gestiegen, so hört der Ausfluß auf, beginnt aber sogleich wieder, wenn dieses Wasser sinkt, so daß der Spiegel constant bleibt, so lange die innere Oeffnung des Hebers eintaucht. — Besonders interessant ist die Mariotte'sche Flasche auch dadurch, daß in derselben der Druck des Wassers über der Höhe ab der Röhrenmündung ganz aufgehoben ist und zwar durch den aus der Röhrenmündung tretenden Luftdruck nach oben, wodurch uns diese Erscheinung das Vorhandensein des Luftdruckes nach oben erkennen läßt.

202 **Der Auftrieb des Luftdruckes, der Luftballon.** Da die Luftarten mit den flüssigen Körpern in der leichten Beweglichkeit der Theilchen übereinstimmen, so gilt für dieselben auch das Gesetz des Auftriebes, das Archimedische Princip. Jeder

Körper verliert in der Luft so viel an seinem Gewichte, als die verdrängte Luftmenge wiegt. Man kann dies nachweisen mittels des **Wagmanometers** oder **Dasymeters** (δασύς — dicht). Dasselbe besteht aus einer kleinen Wage, die statt der Schalen eine große und eine kleine Kugel trägt und mit denselben im Gleichgewichte ist. Wenn nun das Archimedische Princip für die Luft Geltung hat, so muß die größere Kugel in der Luft mehr von ihrem Gewichte verlieren als die kleinere; und die Kugeln, die mit diesem Verluste sich das Gleichgewicht halten, können dies ohne den Verlust nicht mehr, weil die größere Kugel durch Beseitigung des Verlustes mehr gewinnt als die kleinere; also muß die erstere an sich mehr wiegen als die letztere. Diese Folgerung aus der Geltung des Archimedischen Princips bewährt sich vollkommen; denn bringt man den Apparat unter die Glocke einer Luftpumpe und pumpt dieselbe allmälig leer, so sinkt die größere Kugel um so mehr, je dünner die Luft durch das Auspumpen wird. Es kann daher dieser Apparat auch zum Abschätzen der Dichte oder der Dünne der Luft dienen, woraus sich seine Namen erklären. — Wenn nun, wie aus diesem Versuche folgt, ein Körper in der Luft einen Gewichtsverlust erfährt, so muß er auch einem Drucke von unten nach oben, einem Auftriebe ausgesetzt sein, wie wir auch schon an der Mariotte'schen Flasche wahrnahmen; und dieser Auftrieb muß nach dem Archimedischen Princip gleich dem Gewichte des verdrängten Luftvolumens sein. Körper, welche eben so schwer sind wie die Luft, müssen in derselben schweben, wie wohl manche Dunstbläschen von Nebel und Wolken; Körper, welche leichter sind als die Luft, müssen in derselben aufwärts steigen. Man kann dies zeigen an Seifenblasen, Ballonen von Kautschuk, Collodium, Goldschlägerhaut oder Schafhäutchen, die mit Wasserstoff gefüllt, lebhaft aufsteigen, an kleinen Papierballonen oder den Matten von Elsenraupen, an deren untere Oeffnung ein Schwämmchen mit Spiritus durch Eisendraht befestigt und angezündet wird; die Luft in den Ballonen wird dann heiß, dehnt sich aus, wird dadurch leichter und verdrängt einen Theil der Luft, wonach der Ballon so leicht ist, daß er rasch in die Höhe steigt. Hierauf beruhen die Luftballone, erfunden von Gebrüder Montgolfier in Anonay 1783.

Ein Luftballon besteht aus einer, gewöhnlich nahezu kugelförmigen Hülle von leichtem, aber starkem Zeuge, welche mit einem sehr leichten Gas, erwärmter Luft, Wasserstoffgas, erfüllt ist. Die Steigkraft des Ballons ist gleich dem Gewichte der verdrängten Luft weniger dem Gewichte des Ballons. Ist d der Durchmesser des Ballons in Centimeter, s und s' das spec. Gew. der Luft und des angewandten Gases und a das Gewicht von 1^{qcm} des Hüllenstoffes, so ist die Steigkraft $= \frac{1}{6} d^3\pi . s - (\frac{1}{6} d^3\pi . s' + d^2\pi . a) = \frac{1}{6} d^3\pi (s - s') - a d^2\pi$. — Montgolfier wandte erwärmte Luft an, indem er unter dem unten offen gelassenen Ballon ein Strohfeuer anzündete; daher werden Ballone mit erwärmter Luft **Montgolfièren** genannt. Charles schlug sogleich das vortheilhafteste, weil leichteste Gas, das Wasserstoffgas vor, und stieg mit einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon, einer sogenannten **Charlière**, am 1. Dec. 1783 von den Tuilerien in Anwesenheit des Hofes und mehrerer hunderttausende von bewundernden Zuschauern in einer an dem Ballon hängenden Gondel auf. Die Charlièren haben zwar die größte Steigkraft, aber sind kostspielig und unzuverlässig. Denn der Wasserstoff diffundirt am stärksten durch die Hülle, wodurch die große Steigkraft bald gering wird und der Ballon sinkt; auch dehnt sich das Gas stark aus, wenn der Ballon in Höhen von geringerem Drucke gestiegen ist, und droht durch seine Spannung den Ballon zu zerreißen; man darf daher den Ballon nicht ganz mit Wasserstoff füllen und muß ihn unten offen lassen, damit überflüssiges Gas entweiche; auch muß oben eine Klappe angebracht sein, um Gas herauslassen zu können, wenn das Herablassen beabsichtigt wird; und für den Fall zu starken Gasverlustes muß Ballast, aus Sandsäcken bestehend, mitgenommen werden, um zu rasches Sinken zu verhindern oder neues Steigen zu veranlassen. Solche Gas- und Ballastverluste sind aber auf einer Luftfahrt nicht wieder zu ersetzen, wodurch das Lenken in verticaler Richtung bald unmöglich wird. Diese Nachtheile haben die Montgolfièren nicht; denn man kann bei diesen durch Schüren oder Schw[illegible]uers nach Belieben Steigen und Sinken hervorrufen. Deßhalb verband auch [illegible]ozier, der schon vor Charles zweimal aufgestiegen war, eine kleine Montgolfière [illegible]er größeren Charlière, um die größere Steigkraft der letzteren mit der leichtere[illegible]barkeit der

ersteren zu vereinigen, büßte aber bei dem Versuche, mit einer solchen Carolo-Montgolfière nach England zu reisen, in entsetzlicher Weise das Leben ein; auch Graf Zambeccari hatte kein Glück mit dieser Verbindung. Man hat wegen der Feuergefährlichkeit und der geringen Steigkraft die Montgolfièren trotz ihrer sonstigen Vorzüge verlassen und füllt jetzt die Ballone mit Leuchtgas nach dem Vorgange des Engländers Green, der in neuerer Zeit die meisten Luftfahrten gemacht hat und auf einer derselben in 19 Stunden von London nach Weilburg kam. Das Leuchtgas ist zwar nur halb so schwer als die atm. Luft, besitzt aber doch noch Steigkraft genug für die Schau- und Vergnügungszwecke, denen die Ballone meist gewidmet sind; sie müssen nur hinreichend groß sein, dann resultirt auch einem weniger leichten Gas eine größere und dauernde Steigkraft, weil die Steigkraft nahezu mit der dritten Potenz, die Diffusion aber nur mit der zweiten Potenz des Durchmessers wächst. Der größte Ballon, mit dem je Fahrten unternommen wurden, war „der Riese“ von Nadar, der aus zwei über einander stehenden Ballonen bestand, 6000cbm Gas faßte, und 45m hoch war, fast so hoch wie ein Kirchthurm; wegen dieser Größe konnten zweitägige Fahrten mit dem Riesen unternommen werden; die Gondel enthielt 2 Cajüten für Capitän und Passagiere, 1 Gepäckraum, 1 Provisionskammer, Waschraum, Photographie und Druckerei, 35—40 Personen konnten mitfahren; sie war aus Weiden geflochten, außen mit Segeltuch und innen mit Kautschuk überzogen, 4m lang, 2,3m breit und 3m hoch, ungefähr wie ein Eisenbahnwagen. Auf der größten Reise, die Nadar unter Oberleitung der Gebrüder Godard unternahm, und auf welcher er am 18. Oct. 1863 Nachmittags 5 Uhr in Paris aufstieg und über Belgien und Holland fliegend am 19. Oct. Morgens 10 Uhr bei Rethem an der Aller im Hannöver'schen niederfiel, versagte das Ventil, die Ankertaue rissen und die Gondel wurde lange Strecken über Wald und Feld geschleift, auf- und abgestoßen, so daß einige von den 9 Reisenden schwer verwundet wurden. Am 15. April 1875 unternahmen Crocé-Spinelli, Sivel und Tissandier in Paris eine Luftfahrt zu wissenschaftlichen Zwecken; in einer Höhe von 8000m erstickten die beiden ersteren, obwohl sie aus mitgenommenen Sauerstoffschläuchen athmeten. Glaisher und Coxwell hatten 1862 schon 11000m Höhe erreicht, wobei ersterer bewußtlos wurde und letzterem eine Hand erfror. So sind die Luftfahrten noch immer lebensgefährliche Wagnisse.

Nützlich sind die Ballone, außer einigen Verwendungen zu Kriegszwecken (Fleurus 1794, Venedig 1849, Paris 1870), noch nicht geworden, weil man sie noch nicht in horizontaler Richtung zu lenken versteht. Gleich nach der Erfindung wurden schon Versuche gemacht, mit Schaufelrädern und schaufelartigen Flügeln die Gondel und damit auch den Ballon nach verschiedenen Richtungen zu lenken; man fand, was auch die Rechnung ergibt, daß bei ganz ruhiger Luft einige Menschen dem Ballon mit solchen Einrichtungen eine wagrechte Geschw. von ca. 1m ertheilen können. Dasselbe haben neuere unter Leitung von Helmholtz angestellte, durch die deutsche Reichsregierung veranlaßte Versuche ergeben, sowie die Versuche von Paul Hänlein aus Mainz, der einen Ballon durch eine von einem Gasmotor getriebene Schiffsschraube fortbewegte. Um größere Geschw. zu erzielen, müßte, wie die Rechnung ergibt, die Kraft mit der neunten Potenz der Geschw. im Verhältnisse stehen, also für eine Geschw. von 3m 19683 mal größer werden. Man müßte für größere Geschw. eine Kraftmaschine mitnehmen; dafür müßte wiederum die Steigkraft, also auch der Ballon größer werden, für dessen Bewegung auch die Kraft wieder wachsen würde. In dieser Weise potenziren sich die Verhältnisse gegenseitig, so daß selbst für vollkommen ruhige Luft auch die Anwendung der compendiösesten Gasmaschine zum Treiben eines Schraubenrades wenig Erfolg verspricht. Noch weniger möglich erscheint aber die Lenkung in bewegter Luft; und die Luft ist fast immer in sehr lebhaften Strömungen begriffen, wie Greens und Nadars rasche Fahrten zeigen, sowie der Ballon, der am 16. Dec. 1804 in 22 Stunden von Paris nach Rom flog. Wären diese Strömungen constant und in verschiedenen Höhen in bestimmter Weise verschieden gerichtet, so könnte man dieselben zu Fahrten benutzen, indem man sich zu der Luftschicht erhöbe, welche gerade die beabsichtigte Richtung hätte, oder man könnte auch die verschiedenen Richtungen combiniren; allein die Luftströme sind wechselnd und unregelmäßig, zur einen Zeit von einer Richtung durch bedeutende Höhen, zu einer anderen Zeit schon in geringen Abständen verschieden. Wollte man gar den Strömungen entgegenfahren, so müßten ungeheure Kräfte zu Gebote stehen; denn die Ströme haben eine durchschnittliche Geschw. von 10m, haben also gegen den Ballon, wenn derselbe mit der Locomotive wetteifern und eine Geschw. von 12m erreichen soll, eine relative Widerstandsgeschw. von 22m; bei solchen großen Geschw. aber wächst der Widerstand nicht blos mit der ersten, sondern auch mit der zweiten und dritten Potenz der Geschw., wodurch die Kräfte zur Ueberwindung unaufbringlich werden. Nur dann würde wohl die Lenkung erreichbar scheinen, wenn es gelänge, luftleere Räume an den Seiten eines Luftschiffes herzustellen, um durch den Luftdruck selbst das Schiff nach diesen Seiten voranschieben zu lassen.

Wissenschaftliche Luftfahrten wurden unternommen von Biot und Gay-Lussac am 24. Aug. 1804, von Gay-Lussac allein am 16. Sept. 1804, wobei derselbe eine Höhe von

7000^m erreichte, von Barral und Bixio am 27. Juli 1850, von der Sternwarte zu Kew im Jahre 1852, von Glaisher unter den Auspicien der „British Association" von 1862 an mehr als 25. Es wurden hierbei besonders beachtet die Abnahme des Luftdruckes und der Temperatur mit der Höhe, die Luftströmungen und sonstige Wettererscheinungen, die Elektricität der Atmosphäre u. s. w. Von den 54 Ballonen, die 1870/71 aus dem belagerten Paris aufstiegen, flog einer fast nach Lappland, einer nach Solingen, einer nach München, mehrere verschwanden spurlos, versanken also wohl im Meere, die übrigen flogen weniger weit, aber nach allen Weltgegenden, was hinreichend die Verschiedenheit der hohen Luftströmungen beweist.

203 Aufg. 332. Wieviel Flüssigkeit fließt per Secunde aus einem Schenkelheber von 2^{cm} Durchmesser, wenn der innere Schenkel 20^{cm} frei und der äußere 1^m hoch ist? Aufl.: 1244^{ccm}. — Aufg. 333. Wie hoch muß der innere Schenkel frei sein, wenn nur 1000^{ccm} ausfließen sollen? Aufl.: 49^{cm}. — A. 334. Welchen Druck muß der Kolben einer Saugpumpe beim Hube ausüben, wenn die Entfernung des Ausflußrohres vom Wasserspiegel = d ist? Anl.: Sei die Entfernung des Rohres vom Kolben = y^m, so drücken auf den Kolben nach unten $10 + y^m$, nach oben $10 - (d - y)$; folglich Restdruck nach unten = d^m Wasser = $1000\, d^{kg}$ per qm. — A. 335. Welcher Effect muß bei dieser Pumpe verwendet werden, wenn jede Secunde ein Kolbenhub von der Höhe h stattfindet? Aufl.: $^1/_{75} . 1000\, dh$ Pferde. — A. 336. Wie groß ist der Effect, wenn $d = 5^m$, $h = 1^m$ und die Kolbenfläche $= 1^{qdm}$? Aufl.: $^2/_3$ e. — A. 337. Ist der bei der Druckpumpe nöthige Kolbendruck ein anderer? Aufl.: Ebenfalls $1000 d^{kg}$ per qm; nur ist der Druck auf Hub und Schub vertheilt. — A. 338. Welche Wassermenge gibt die Pumpe (A. 336) in 1 Sec.? Aufl.: $1000\, h^{kg}$ per qm; hier per qdm = 10^{kg}. — A. 339. Wie groß ist der Gewichtsverlust eines Würfels von 1^m Kante in der Luft? Aufl.: 1293^g. — A. 340. Was wiegen Kugeln von Blei und Lindenholz im luftleeren Raume, wenn sie in der Luft 2 Ctr. wiegen? Aufl.: $99988,7^g$, 99741^g. — A. 341. Welches ist der Auftrieb einer Kugel von 20^m Durchmesser in der Luft? Aufl.: 5416^{kg}. — A. 342. Wie groß ist die Steigkraft einer Charlière von 10^m Durchmesser? Aufl.: 631^{kg}. — A. 343. Wie groß, wenn der qm Taffet 200^g wiegt? Aufl.: 568^{kg}. — A. 344. Welchen Durchmesser muß eine solche Charlière haben, damit sie 1870^{kg} tragen und noch 100^{kg} Steigkraft haben kann? Anl.: $^1/_6\, d^3\pi . (s - s') - ad^2\pi - 1870\,000 = 100\,000$; woraus d ungefähr = $18,7^m$. — A. 345. Wie groß ist die Steigkraft einer Greenière von 10^m Durchmesser, sp. G. des Gases = 0,6? Aufl.: 270^{kg}.

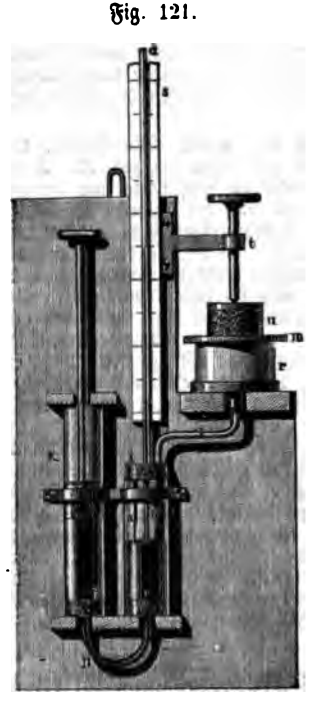
3. Anwendung der Ausdehnsamkeit und des Mariotte'schen Gesetzes.

204 **Der Heronsball** (Heron von Alexandrien 210 v. Chr.). Der Heronsball besteht aus einem theilweise mit Flüssigkeit gefüllten, luftdicht geschlossenen Gefäße, in welches von außen eine bis in die Flüssigkeit gehende Röhre hineinführt. Wird durch diese Röhre Luft eingeblasen, so steigt dieselbe aus der Flüssigkeit in den Luftraum des Gefäßes; hierdurch wird die Luft verdichtet und erhält nach dem Mariotte'schen Gesetze eine größere Spannung. Vermöge dieser Spannung übt die eingeschlossene Luft, wenn das Einblasen unterbrochen wird, einen stärkeren Druck auf das Wasser aus als die äußere Luft; daher muß das Wasser in der Röhre steigen und, wenn der Druck stark genug ist, aus der Röhre ausspritzen.

Der Heronsball findet Anwendung: 1. In der Feuerspritze; dieselbe besteht aus zwei Druckpumpen, welche das Wasser abwechselnd in einen Heronsball, Windkessel genannt, eintreiben, wodurch die Luft über dem Wasser immer mehr verdichtet wird und endlich einen so großen Druck ausübt, daß sie das Wasser aus der Röhre, die in den sogenannten Schwanenhals endet oder in einen Schlauch übergeht, haushoch emportreibt. 2. Zu Springbrunnen mit Windkessel, welche wie die Feuerspritze eingerichtet sind und auch zum Aufsteigen von Flüssigkeiten in Fabrikgebäuden benutzt werden. 3. Zu der Spritzflasche der Chemiker und Apotheker; dieselbe hat eine Einblase- und eine Spritzröhre, wodurch das Einblasen und Spritzen gleichzeitig und dauernd möglich wird. 4. Er erklärt die Geiser (mit Ausnahme des großen), intermittirende heiße Springbrunnen auf der Insel Island, in welchen das Wasser dann steigt, wenn sich durch den Einfluß vulkanischer Hitze Dampf genug über demselben gebildet hat. 5. Im Heronsbrunnen, einem Heronsball, dessen ausspritzendes Wasser in ein Becken fällt, welches durch eine Röhre mit einem zweiten geschlossenen Gefäße verbunden ist, so daß die in demselben verdichtete Luft durch eine zweite Röhre in den Luftraum des Heronsballes steigt und dadurch das Ausspritzen permanent macht.

205 **Das Volumenometer** (Kopp 1840). Dieser Apparat (Fig. 121) dient zum Bestimmen des Volumens kleiner, pulveriger, faseriger u. dergl. Körper. Man kennt das Volumen v der Luft, welche bei dem Barometerstande h das Gefäß r, die Röhre q und den Cylinder ii vollständig erfüllt, wobei das Quecksilber sich noch in dem Cylinder k befindet und blos bis an die Bodenöffnung des Cylinders ii reicht. Wird nun der Kolben in k niedergedrückt und steigt hierdurch das Quecksilber in ii bis an die Spitze des Platinstiftes a, so wird die Luft verdichtet bis zu dem Volumen v'. Ihre Spannung wächst hierdurch um einen Betrag, der durch die Höhe der Quecksilbersäule in der Barometerröhre cd gemessen wird und $^1/_n$ h sein möge. Folglich ist nach dem Mariotte'schen Gesetze $v : v' = (h + {}^1/_n h) : h$, woraus $v - v' = v / (n + 1)$. — Bringt man nun den zu untersuchenden Körper, dessen Volumen $= x$ sei, in das Gefäß r und verfährt ganz in der eben beschriebenen Weise, so ist $v - x$ das anfängliche und $v' - x$ das spätere Volumen der eingeschlossenen Luft. Für das letztere Volumen aber wird das Quecksilber in der Barometerröhre an einem anderen Punkte stehen als bei dem ersten Versuche, weil zum Comprimiren der geringeren Luftmenge eine andere Kraft als bei dem ersten Versuche erforderlich ist; es sei der jetzige Zuwachs der Spannung $^1/_m$ h, so ist $(v - x) : (v - v') = (h + {}^1/_m h) : {}^1/_m h$. Substituirt man hierin den obigen Werth für $v - v'$, so ergibt sich das gesuchte Volumen $x = (n - m) v / (n + 1)$. Auch Regnault und noch früher Say haben Apparate zu demselben Zwecke construirt, Stereometer genannt, welche aber hinter Kopps Volumenometer zurückstehen. Der linke Theil des Apparates kann auch zur Messung des Luftdruckes benutzt werden und heißt in diesem Falle Differentialbarometer; hierbei muß die Verbindung mit r unterbrochen und i luftdicht geschlossen werden. Bezeichnet hier v und v' das Volumen der Luft im Cylinder vor und nach dem Niederschieben des Kolbens, b den Barometerstand und h das Steigen des Quecksilbers in der Röhre d, so ist $v : v' = (b + h) : b$, woraus man b berechnen kann $= v'h / (v - v')$. Da v und v' constant und bekannt sind, so hat man nur den bekannten Quotient $v' / (v - v')$ mit dem jeweiligen h zu multipliciren, um den Barometerstand zu finden. Dieses Barometer bedarf zwar für jede Beobachtung einer Verschiebung des Kolbens, ist aber sehr compendiös.

Fig. 121.



206 **Das Manometer**) μανός = dünn) ist ein Apparat zum Messen der Spannung von Luftarten, besonders von heißen Dämpfen. Das offene Quecksilbermanometer besteht aus einem Quecksilber enthaltenden Eisenkasten, in welchen eine Röhre die verdichteten Gase über das Quecksilber führt, während eine zweite gläserne Röhre in das Quecksilber taucht; die Gase treiben das Quecksilber in dieser Röhre 1.76, 2.76, 3.76^{cm} u. s. w. hoch, wenn die Spannung 2, 3, 4 u. s. w. Atmosphären beträgt; daher müssen offene Manometer unhandlich hoch sein. Man hat deßhalb die Manometerröhre oben geschlossen; dann verdichtet sich über dem steigenden Quecksilber die Luft; es kann daher das Quecksilber nur so hoch steigen, daß das Gewicht seiner Säule und die Spannung der verdichteten Luft zusammen der zu messenden Spannung gleich sind; nach diesem Grundsatze ist die hinter der Röhre angebrachte Skale eingetheilt. Noch bequemer sind die Metallmanometer, die den Metallbarometern ähnlich sind. Das Röhrenmanometer von Schinz, gewöhnlich nach Bourdon genannt, enthält wie das Metallic eine kreisförmig gebogene Röhre, deren eines Ende mit dem Dampfe communicirt, während das zweite, freie und geschlossene Ende auf einen Zeiger wirkt und seine durch den Dampfdruck erzeugte Bewegung demselben mittheilt. Bei dem Plattenmanometer von Schäffer und Budenberg wirkt der Dampf wie bei dem Holosteric auf eine cannelirte Platte, welche dadurch je nach dem Dampfdrucke eine mehr oder minder große Einbiegung erleidet, die auf einen Zeiger übertragen wird. Die einfachsten, jedoch nur für geringe Spannungen brauchbaren Manometer sind die doppelt gebogenen Sicherheitsröhren.

207 **Die Gebläse** sind Vorrichtungen zum Einblasen von Luft, gewöhnlich zu dem Zwecke der Verstärkung des Feuers. In irgend einem Raume wird die Luft verdichtet und dieser

Raum dann durch eine Röhre mit dem Feuer verbunden, so daß die verdichtete Luft durch ihre Spannung in dasselbe strömt. Wenn nämlich die Spannung der eingeschlossenen Luft größer wird, so wird auch ihre Ausdehnsamkeit größer, während die äußere Luft die geringere Ausdehnsamkeit besitzt, die dem Luftdrucke entspricht; folglich muß aus dem Verdichtungsraume so lange Luft ausströmen, bis beiderseits die Spannung dieselbe ist. Das einfachste Gebläse ist der einfache Blasebalg, aus zwei Brettchen bestehend, die mit gefaltetem Leder einen veränderlichen Raum einschließen, von dessen schmalem Ende eine Röhre ausgeht. Werden die Brettchen aus einander gezogen, so wird der Raum größer und die Luft dünner; die äußere Luft strömt dann durch die Röhre ein. Werden die Platten zusammengedrückt, so wird der Raum kleiner und die Luft dichter; sie strömt dann durch die Röhre aus. Besser ist es, wenn an der einen Platte ein sich nach innen öffnendes Ventil angebracht ist. Besteht der Blasebalg aus zwei durch ein zweites Ventil verbundenen Theilen, so strömt die Luft mehr ununterbrochen aus. In dem Cylindergebläse wird die Luft durch einen hin- und hergehenden Kolben verdichtet und in dem Trommelgebläse und Ventilator durch die rasche Bewegung der Schaufeln eines in einem Gehäuse sich drehenden Schaufelrades.

Die Gasometer sind Vorrichtungen zum Aufsammeln von Gasen. Bei dem Glockengasometer strömt das Gas durch eine Röhre in eine schwimmende Glocke, hebt durch seine Spannung die Glocke immer mehr aus dem Wasser und schafft sich so selbst seinen Raum; wird der Hahn dieser Röhre geschlossen und der einer zweiten ins Freie führenden Röhre geöffnet, so drückt das Gewicht der Glocke das Gas zusammen und dieses muß ausströmen. Die Gefäßgasometer der Chemiker beruhen auf dem Auftriebe, auf dem Emporsteigen von Luft in Wasser.

208 **Das Athmen.** Bei dem Ausathmen werden die Rippen gesenkt und das Zwerchfell gehoben; dadurch wird der Brustkasten verengert und die Luft in den Lungen verdichtet, wonach dieselbe ins Freie strömen muß. Das Einathmen geschieht durch den Luftdruck; das Zwerchfell wird gesenkt, die Rippen werden gehoben, dadurch wird der Brustkorb erweitert und die Luft in den Lungen verdünnt; die äußere Luft strömt durch ihre vom Luftdruck erzeugte Spannung in die Lungen. Durch sehr starke Erweiterung kann man viel Luft einnehmen und dieselbe dann durch allmäliges Verengern langsam ausströmen lassen, worauf das Blasen z. B. mit dem Löthrohre beruht.

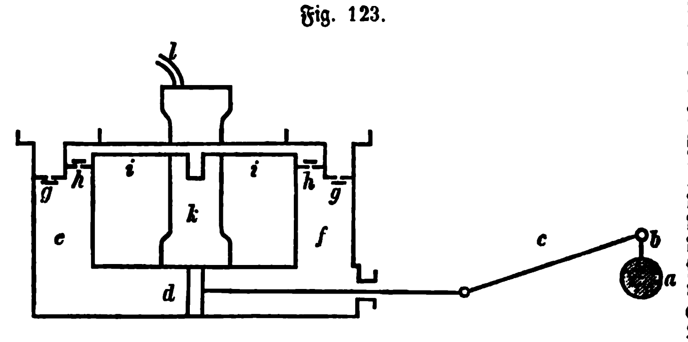
209 **Die Compressionspumpe** (Fig. 122) hat den Zweck, in einem beliebigen Raume r ein Gas, das durch die Röhre a herbeiströmt, zu verdichten. Sie besteht aus einem Stiefel b mit einem Kolben c; das Einmündungsrohr a muß eine solche Lage haben, daß es beim Herabgehen des Kolbens sogleich von dem Hauptraume des Stiefels abgeschlossen wird. Hierdurch verdichtet sich das eingeströmte Gas oder die Luft, drückt das nach außen sich öffnende Ventil auf und strömt in den Raum r. Bei dem Rückgange des Kolbens wird die Luft über dem Ventil dünner, daher wird das Ventil durch die verdichtete Luft in r geschlossen und läßt das eingetretene Gas nicht wieder zurücktreten. Man wendet die Compressionspumpe an bei Taucherglocken, bei Aquarien, bei Windbüchsen, an welchen das durch eine Feder angedrückte Ventil für einen Augenblick durch das Anziehen des Hahnes geöffnet wird, besonders aber zu Versuchen über die Condensation der Gase. Man bedient sich hierzu vorwiegend des Apparates von Natterer (1840), an welchem der Raum r ein sehr dickwandige Flasche von Schmiedeeisen ist und der Kolben durch ein Kurbelrad hin und hergeführt wird. Mit diesem Apparat kann man die meisten Gase flüssig machen, Salzsäure bei 25, Stickoxydul bei 31, Kohlendioxyd bei 37, Aethylen C_2H_4 bei 43 Atmosphären Druck und einer Temperatur von etwa 0° C, die durch um die Flasche gelegtes Eis herbeigeführt wird.

Fig. 122.

Eine sehr nützliche Anwendung hat die Compressionspumpe an den großen Gebirgstunnels des Mont-Cenis und des St. Gotthardt gefunden; man setzt nämlich bei diesen Werken die Gesteinsbohrer nicht mittels Dampfmaschinen, sondern mittels Luftmaschinen in Thätigkeit, weil jene Luft verzehren und Rauch erzeugen, diese aber gleichzeitig zur Lufterneuerung dienen können. Die Luftmaschinen haben ganz dieselbe Einrichtung wie die Dampfmaschinen, nur werden sie statt des Dampfes mit comprimirter Luft von 5 Atm.

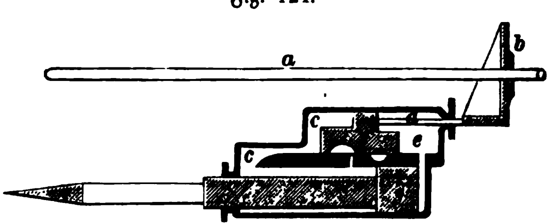
Spannung getrieben. Die Compressionspumpe ist in Fig. 123 schematisch dargestellt; a ist die Welle, die von einem Wasserrad umgedreht wird, und welche mittels Kurbel b und Pläuelstange c den Kolben d im Stiefel hin- und herbewegt, wodurch die Luft in den beiden Cylindern e und f, in ersterem beim Schub, in letzterem beim Hub verdichtet wird.

Fig. 123.



Geht der Kolben nach rechts, so schließt sich in e das Druckventil h, während das Saugventil g sich öffnet und Luft aus der Atmosphäre einläßt; dagegen schließt sich in f das Saugventil g, während sich das Druckventil h öffnet und die verdichtete Luft durch das Rohr i in das Gefäß k führt, wo sie unter dem Drucke einer 50m hohen Wassersäule auf ihrer Spannung von 5at erhalten wird. Durch eine Röhrenleitung *l* strömt nun diese Luft in den Tunnel bis zu den Bohrwagen, wo sie die genannten Luftmaschinen treibt; diese haben nicht nur die Bohrwagen vorwärts und zurück zu bewegen, sondern auch die Bohrer in das Gestein zu stoßen, darin zu drehen und vorwärts zu schieben, wenn das Bohrloch tiefer geworden ist. In Fig. 124 ist der wesentliche Theil einer Bohrstoßmaschine skizzirt, woraus zu erkennen ist, wie der Bohrer rasch vorangestoßen und langsam zurückgeführt wird, und wie die verdichtete Luft selbst den Schieber bewegt.

Fig. 124.

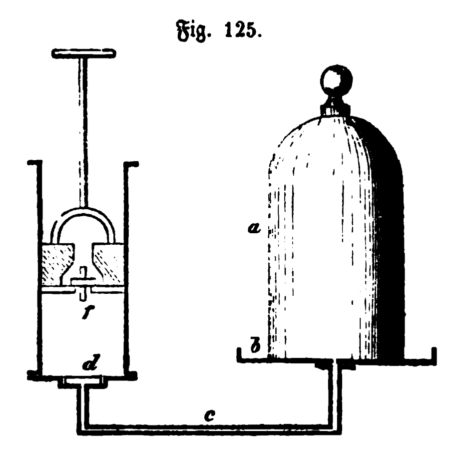


Eine Luftmaschine eingerichtet wie eine Dampfmaschine versetzt die Welle a in Umdrehung, welche außer anderen Bewegungen die Drehung des schiefen Rades b zu vollbringen hat; gegen dasselbe drückt die in dem Schiebkasten c immer vorhandene verdichtete Luft die Schieberstange d, so daß der Schieber s in der gezeichneten Stellung die äußerste Lage links einnimmt, und die verdichtete Luft durch den Kanal e hinter den Kolben g strömen und durch ihren Druck auf dessen große Hinterfläche voranstoßen kann. Es schadet nichts, daß der Raum vor dem Kolben mit dem Schiebkasten in freier Verbindung steht und demnach ebenfalls mit verdichteter Luft erfüllt ist; denn diese kann nur auf die kleine ringförmige Vorderfläche wirken. Der geringe Druck auf dieselbe reicht jedoch zur langsamen Rückbewegung des Kolbens aus; denn gleichzeitig mit dem Vorangange desselben hat sich das Rad b halb gedreht, die Luft hat den Schieber in die äußerste Stellung rechts geführt und dadurch den Kanal e geschlossen, während der Hohlraum des Schiebers mit dem in die freie Luft gehenden Hohlraume der Cylinderwand communicirt; und in den Hohlraum des Schiebers kann jetzt, da der Kolben seine äußerste Stellung links hat, die Luft hinter dem Kolben strömen, so daß hinter dem Kolben nur 1at Druck vorhanden ist; folglich kann jetzt der Druck der verdichteten Luft vor dem Kolben, da er nur auf die kleine Ringfläche wirkt, den Kolben langsam zurücktreiben. Die übrigen nicht weniger interessanten Theile der Tunnelmaschine müssen wir übergehen.

210 **Die Luftpumpe** (Otto von Guericke, Bürgermeister von Magdeburg, ca 1650) hat den Zweck, Räume luftleer, oder besser gesagt, luftverdünnt zu pumpen; am häufigsten benutzt man Glasglocken a (Fig. 125), Recipienten genannt, welche mit dem abgeschliffenen und mit Schmiere versehenen Rande auf den ebenen und abgeschliffenen Teller b gesetzt werden, wodurch sie mittels der Röhre c mit der eigentlichen Luftpumpe in Verbindung stehen. Diese hat dieselbe Einrichtung und dieselbe Wirkungsweise wie die Saugpumpe. Bei dem Kolbenhube schließt sich das Kolbenventil f, das Bodenventil d hebt sich, wodurch die Luft in dem Reci-

pienten verdünnt wird; bei dem Kolbenschube schließt sich das Bodenventil, wodurch die Luft in dem Recipienten ihre Verdünnung behält, während die Luft in dem Stiefel durch das gehobene Kolbenventil entweicht. Durch öftere Wiederholung wird die Luft in der Glocke immer dünner, bis sie endlich so dünn ist, daß ihre Spannung das Ventil d nicht mehr heben kann, womit die Wirksamkeit derselben zu Ende ist. Um diesen Nachtheil zu beseitigen, wendet man Blasenventile an, weil diese nur geringer Kraft zum Heben bedürfen, oder man befestigt das an der Seite des Bodens sitzende Kegelventil an einer durch den Kolben gehenden Stange, welche von dem Kolben mit nach oben genommen wird, bis ein hoch oben befindlicher Ansatz der Stange gegen den Cylinderdeckel stößt; durch das Heben der Stange wird das Ventil geöffnet und beim Kolbenschube durch die mitgenommene Stange wieder geschlossen. Auch hat man Hähne statt der Ventile, welche indessen von der Hand oder durch einen eigenen Mechanismus gedreht werden müssen.

Fig. 125.



Keine Luftpumpe aber kann vollkommene Luftleere erzeugen; denn die Wirkung der Luftpumpe besteht nur in einer fortgesetzten Verdünnung, indem das Luftvolumen r des Recipienten sich beim Kolbenhube noch in den Stiefel s ausdehnt, so daß das Volumen auf $r + s$ erhöht und demnach die Dichte in dem Verhältnisse $r : (r + s)$ vermindert wird. Diese Verminderung vergrößert sich bei jedem Hube in demselben Verhältnisse; also beträgt die Dichte nach n Hüben nur noch $r^n : (r + s)^n$ oder $1 : (1 + s/r)^n$, welcher Ausdruck nur dann $= 0$ wird, wenn n unendlich groß ist; also kann die vollkommenste Pumpe niemals völlige Leere hervorrufen. Nun sind aber die Luftpumpen durchaus nicht vollkommen; sie leiden hauptsächlich an 3 Uebelständen: 1. Die Abschlüsse sind nicht hermetisch, was um so nachtheiliger wirkt, je stärker die Verdünnung ist. 2. Das Schmiermittel absorbirt Luft und diese strömt bei dem Hube in den Verdünnungsraum. Deleuil läßt deßhalb seinen Kolben die Cylinderwand nicht berühren, so daß sich zwischen beiden eine dünne Luftschicht befindet, die durch Adhäsion so fest haftet, daß sie sich nicht in den Verdünnungsraum ergießt; diese Maschine bedarf auch weniger Kraft und beseitigt den Nachtheil des Eintrocknens der Schmiere, des Verstopfens der Röhren und Ventile. Auf der großen Ausstellung von 1867 war eine große Deleuil'sche Pumpe, welche einen Raum von 250 Liter Inhalt in ¼ Stunde bis auf 10mm Druck verdünnte, während kleinere Räume auf 1mm herabgetrieben wurden. 3. D e r s c h ä d l i c h e R a u m. Der Kolben schließt nie absolut an den Stiefelboden; auch hebt sich beim Schube sein Ventil; in der tiefsten Stellung des Kolbens ist also zwischen den beiden Ventilen ein Raum übrig, der mit äußerer Luft erfüllt ist. Dieser Raum wird der schädliche Raum (v) genannt. Denn beim Hube dehnt sich diese Luft in den Stiefel aus und verdünnt sich hier im Verhältnisse $v : s$. Hat die Luft in dem Recipienten diesen Grad der Verdünnung erreicht, so hat weiteres Pumpen keinen Erfolg. Ist im Pumpen nicht für Verminderung dieses Nachtheils gesorgt, so wird man unter 3mm Spannung nicht gelangen. Staudinger in Gießen schließt den Stiefel oben und bringt an dem Deckel ein Ventil an, so daß über dem Kolben auch nur verdünnte Luft vorhanden ist, und der schädliche Raum sich daher nur mit solcher füllen kann. In den zweistiefeligen Ventilluftpumpen ist durch Babinets Hahn etwas abgeholfen, weil dieser bei dem Schube den schädlichen Raum mit dem anderen Stiefel verbindet, in welchem gerade der Hub geschieht, so daß der schädliche Raum nur verdünnte Luft enthält. In den zweistiefeligen Hahnluftpumpen verfolgt der Graßmann'sche Hahn denselben Zweck. Hierdurch sind Verdünnungen bis zu 1mm Spannung erreichbar. — Es gibt auch einstiefelige doppeltwirkende Luftpumpen (von Bianchi und Staudinger), in welchen also der Kolben nicht blos beim Hube, sondern auch beim Schube Luft saugt. Der Grad der Verdünnung wird gemessen durch die B a r o m e t e r p r o b e, ein nur 20cm hohes Barometer, welches auf die Verbin-

dungsröhre zwischen Stiefel und Teller aufgeschraubt werden kann; das Quecksilber in demselben sinkt erst, wenn die Verdünnung auf 1/4 gebracht ist. Die besten Luftpumpen geben nur eine Verdünnung bis zu 1—2mm Quecksilberdruck; weiter kann man mit Sprengels Luftsauger (214.) und mit der Quecksilberluftpumpe (200.) gehen; die Wasserluftpumpe Bunsens (214.) geht bis zur Spannung des aus dem Wasser entstehenden Dampfes, 7—10mm. In den gewöhnlichen Geißler'schen Röhren ist die Verdünnung eine etwa 1000fache, in den Crookes'schen Röhren eine 30 000fache, nach Crookes' Meinung eine millionfache; jedoch geht bei 50 000facher Verdünnung auch der stärkste Strom nicht mehr durch die Luft.

211 **Versuche mit der Luftpumpe.** Den Luftdruck zeigen folgende Versuche: 1. Das Festhaften des Recipienten. 2. Das feste Zusammenhalten der Magdeburger Halbkugeln. 3. Das Sprengen einer Blase über einem leergepumpten Gefäße; auch der Seitendruck der Luft und der Druck nach oben sind durch einen ähnlichen Versuch zu zeigen. 4. Der Springbrunnen im luftleeren Raume. 5. Der Quecksilber-Regen. 6. Das Barometer unter einem Recipienten. — Die Ausdehnsamkeit der Luft zeigen: 7. Das Anschwellen und Springen einer Blase unter dem Recipienten. 8. Das Schäumen von Bier, das Aufsteigen von Luftblasen in Wasser, das Umgeben eines Stückes in Wasser liegenden Holzes mit Bläschen. 9. Das Glattwerden eines runzeligen Apfels, das Austreten des Eiweißes aus einer Oeffnung in der Schale. 10. Ein Heronsball spritzt unter der Glocke; stellt man aber seine Spitze in Wasser, so tritt die Luft in Blasen aus, und die Flüssigkeit steigt nach dem Zulassen von Luft in den Ball. 11. Wasser steigt aus einem Gefäße in das andere, wenn dieselben durch ein Knierohr verbunden sind, welches luftdicht in das eine Gefäß geht. — Andere interessante Versuche sind: 12. Das Kochen von warmem Wasser unter der Glocke. 13. Das Fallen von Körpern in einer luftleeren Röhre. 14. Das Verlöschen brennender Körper. 15. Das Ersticken kleiner Thiere. 16. Das Nichtentzünden von Pulver durch den Funken. 17. Die schwache Fortpflanzung des Schalles in verdünnter Luft. 18. Das Dasymeter. 19. Das Gefrieren von Wasser durch Aether oder Ammoniak.

So zahlreich die Anwendungen der Luftpumpe in der Physik und Chemie sind, so selten sind sie im Leben. Atmosphärische Eisenbahnen werden wohl noch zu Beförderungen von Briefen und Packeten benutzt, z. B. in London zur raschen Verbindung der Filialposten mit der Hauptpost, haben aber wenig Ausdehnung gefunden; auch in den Zuckerfabriken ist die Luftpumpe nur noch selten in Verwendung; so bleibt nur ihre Verwendung bei dem Imprägniren von Körpern mit Farb- und Gerbstoffen, beim Befeuchten und Trocknen in Fabriken u. dergl.

4. Bewegung der Luftarten.

Die fortschreitenden und drehenden Bewegungen großer Massen unserer Atmosphäre bilden die Winde und Luftströme, die durch die Wärme entstehen und in der Meteorologie betrachtet werden; die schwingenden Bewegungen kleinerer Luftmengen bilden den Schall und werden in der Akustik betrachtet; die Bewegung der einzelnen Luftmoleküle bildet die Luftwärme und gehört daher der Lehre von der Wärme an; diese Molekularbewegungen der Luftarten werden hier nur insofern in's Auge gefaßt, als sie Wirkungen von Luftarten auf feste, flüssige oder andere luftförmige Körper hervorbringen. Außer diesen Molekularwirkungen der Luftarten bleiben hier noch einige specielle Bewegungen kleinerer Luftmengen übrig, das Aufsteigen von Luft in Flüssigkeiten, dann umgekehrt das Mitreißen von Luft durch Ströme flüssiger und luftartiger Körper, und endlich das Ausfließen von Luft aus Gefäßen.

212 **Die Luftblasen.** Die Luftblasen sind Gasmengen, die in Flüssigkeiten vermöge des Auftriebes in die Höhe steigen. Die Spannung einer solchen, frei in einer Flüssigkeit schwebenden Gasmenge muß gleich sein der Spannung der äußeren Luft vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeitssäule über der Gasmenge und um die Oberflächenspannung der Flüssigkeitshaut rings um die Gasmenge. Das erste dieser 3 Glieder ist in allen Fällen, das zweite bei kleinen Gasmengen ringsum gleich groß; folglich muß auch, weil die Spannung der Gasmenge nach allen Richtungen dieselbe ist, die Oberflächenspannung ringsum gleich groß sein; dies ist aber nach 170. nur der Fall, wenn die Krümmung ringsum dieselbe ist, d. h. wenn die Gasmenge Kugelform besitzt. Die Luftblasen sind also kugelförmig.

Diese Form ist um so genauer, je kleiner sie sind. Bei großen Blasen ist der Druck der Flüssigkeit von unten her größer als von oben; folglich muß, damit die Gesammtwirkung

von unten dieselbe sei, die Oberflächenspannung unten kleiner werden, d. h. die Krümmung muß unten schwächer als oben sein, wodurch die Kugelblase unten etwas abgeplattet erscheint. Besonders deutlich tritt dies an ruhig schwebenden Kugeln, z. B. an dem Plateau'schen Tropfen hervor; an steigenden Blasen erfährt die obere Seite einen Widerstand, wodurch auch dort die Form geändert werden kann; dieser Widerstand wächst mit der Dichte der Flüssigkeit und mit der Leichtigkeit der Luftart, so daß eine Blase in Quecksilber sogar oben schwächer wie unten gekrümmt ist. Wird aber der stärkere Druck von unten noch unterstützt durch die Adhäsion einer festen Wand, wie bei dem Aufsteigen von Blasen in Glasröhren, so nimmt nach Melde (1865) die Blase gar Glockenform an; die Basis dieser Glocke zeigt mehrere Ringe, weil die Glocke sich immer neu bildet, und daher immer mehrere Grundflächen von Glocken wegen ihrer weniger leichten Auflöslichkeit übereinander sitzen. Nach Guthries Untersuchungen (1865) wächst die Größe der Blasen unter übrigens gleichen Umständen mit der Dichte der Flüssigkeit, eigentlich aber mit der Steifigkeit derselben, welche bei dichteren Flüssigkeiten größer wird, während die Festigkeit einer Flüssigkeit die Größe der Blasen zu vermindern strebt. — An eingetauchten Körpern, sowie an Gefäßwänden haften kleine Bläschen, weil von der Berührungsstelle aus kein hydrostatischer Druck stattfindet, also der auf die entgegengesetzte Stelle nicht aufgehoben ist und daher das kleine Kügelchen, das durch seine große Oberflächenspannung seine Stabilität erhält, anpreßt.

Das Mitreißen von Luft durch Flüssigkeitstrahlen. 213 Wenn ein schnell dahinschießender Strahl einer Flüssigkeit oder auch einer Luftart durch Luft geht, so reißt er die ringsum adhärirende Luft mit sich fort; in den verdünnten Raum strömt neue Luft mit bedeutender Geschwindigkeit, kommt dadurch auch wieder mit dem Strahle in Berührung und wird von demselben ebenfalls fortgerissen; in manchen Fällen, besonders wenn der Strahl durch dünne Röhren geht, mögen einzelne Theile des Strahles wie Kolben die Luft vor sich hertreiben und dadurch luftleere Räume hinter sich erzeugen, die von schnell nachströmender Luft erfüllt, von eben so schnell folgenden flüssigen Kölbchen wieder von derselben befreit werden. Auf diese Weise entsteht ein fortwährendes Strömen von Luft rings um den Strahl herum in der Richtung desselben und dadurch rings um den Strahl eine Luftverdünnung, welche wieder ein dauerndes Zuströmen von Luft zur Folge hat. Am deutlichsten läßt sich diese Erscheinung zeigen mit dem Apparat von Buff, Fig. 126. Bläst man durch ab einen Luftstrom, so entsteht bei cb eine Luftverdünnung, welche durch Steigen des Quecksilbers bei f ersichtlich ist. Beiläufig gesagt, wenn man bei d einbläst, so entsteht bei bc eine Luftverdichtung, angezeigt durch Fallen des Quecksilbers bei f.

Fig. 126.

Durch die saugende Wirkung eines Strahles erklärt sich die zuerst von Clement und Desormes (1826) beobachtete Erscheinung, daß eine leichte Scheibe einem Luftstrahl entgegen gehen kann. Bläst man mittels des Rohres mn (Fig. 127) durch die Scheibe vz gegen die leichte Papierscheibe st, die locker zwischen einigen Stiften schwebt, so geht dieselbe nach vz hin und klebt beinahe auf dieser Scheibe.

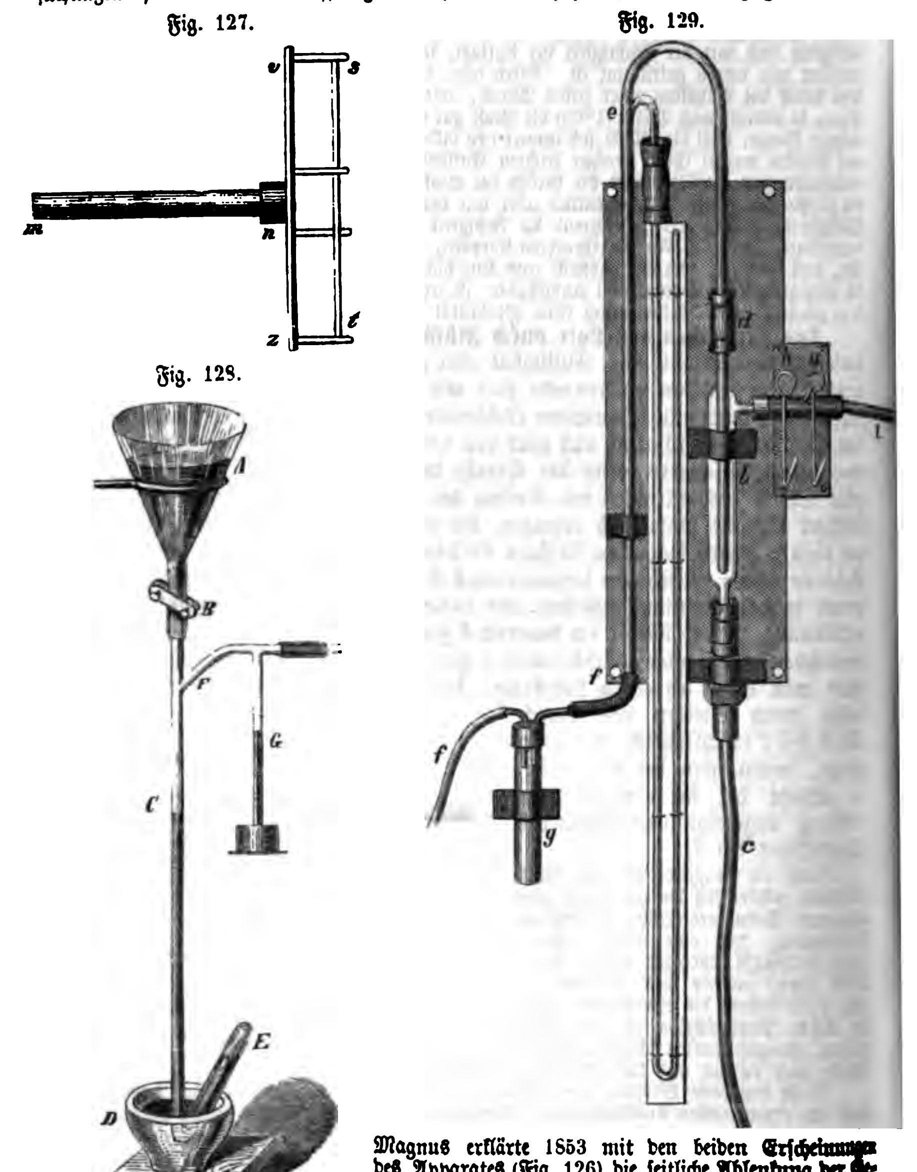
Diese saugende Wirkung von Strahlen ist uns schon begegnet bei der Ausflußmenge eines sich erweiternden Ausflußrohres. Sie hat indeß noch mehrere nützliche Verwendungen gefunden; schon das alte Wassertrommelgebläse beruht auf derselben: herabstürzendes Wasser reißt Luft mit in seinen Kanal, welche durch ein seitliches Rohr in das Schmiedefeuer strömt. Durch das Locomotivenblasrohr geht ein Dampfstrahl in den Kamin der Locomotive, reißt dort die Luft fort, so daß neue Luft durch den Herd nachströmen muß, wodurch der Zug erhalten bleibt. Giffards Injector oder Dampfstrahlpumpe (1860) pumpt durch einen Dampfstrahl Wasser in einen Dampfkessel. Physikalisch am wichtigsten ist Sprengels Luftsauger (1865), Fig. 128. Durch den Quetschhahn B läßt man Quecksilber das Rohr C herabfallen; hierdurch wird irgend ein Gas aus einem mit dem Arme F in Verbindung stehenden Körper ausgesaugt und zu näherer Untersuchung in den

in den Cylinder E geleitet. Graham bediente sich dieses Apparates bei seinen Untersuchungen über Absorption und Diffusion; für die Crookes'schen Röhren und andere physikalische Untersuchungen hat er in mannichfaltigen Constructionen zahlreiche Anwendung gefunden. —

Fig. 127.

Fig. 129.

Fig. 128.



Magnus erklärte 1853 mit den beiden Erscheinungen des Apparates (Fig. 126) die seitliche Ablenkung der Geschosse: die Luft um ein Geschoß herum sei ebenfalls in Rotation und stoße auf der einen Seite durch Vorausbewegung auf die entgegenkommende Luft, während sie auf der anderen Seite derselben ausweiche; so geschehe auf der ersten Seite eine Luftverdichtung und auf der zweiten eine Verdünnung, folglich müsse das Geschoß allmälig nach dieser Seite abgelenkt werden. — Auf die saugende Wirkung von Luftstrahlen gründete ich 1855 einen Vorschlag zur Lenkung der Luftschiffe. — Eine neue wichtige Anwendung des saugenden Strahles ist das **Schnellfilter**

von Bunsen (1868). Der Hauptbestandtheil ist Bunsens **Wasserluftpumpe**, Fig. 129. Diese besteht aus einem weiten Glasgefäße b, in welches das Luftrohr d oben luftdicht eingeschmolzen und fast bis zum unteren Ende herabgeführt ist, während das Glasgefäß unten in das Wasserrohr c übergeht. Wird nun aus der Wasserleitung *l* mittels des Quetschhahnes a Wasser in das Gefäß b hineingelassen, und stürzt dasselbe durch das Wasserrohr mehr als 10^m tief hinab, so reißt dieses Wasser die Luft aus dem Luftrohre d e f und den Gefäßen, die noch mit f in Verbindung stehen und entleert dieselben so vollständig, daß nur noch die Spannung des bei der gerade herrschenden Temperatur möglichen Wasserdampfes von 7—10^{mm} übrig bleibt, wie man aus dem von e ausgehenden offenen Quecksilbermanometer zu erkennen vermag.

Fig. 130.

Fig. 131.

Die saugende Wirkung der Dampfstrahlen hat in den letzten Jahren so zahlreiche neue Anwendungen erfahren, daß es jetzt Fabriken von Dampfstrahlapparaten gibt; die größte Ausbreitung fand Körtings **Dampfstrahl-Unterwind-Gebläse**, das jedoch wegen der Einführung von Wasserdampf in die Feuerstätten nicht in allen Fällen anwendbar ist. Die innere Einrichtung desselben ist aus Fig. 130, seine Verbindung z. B. mit dem Heizraume eines Röhrenkessels aus Fig. 131 zu ersehen. Durch den Dampfkanal a strömt der Dampf in ein nach unten sich verengerndes Gefäß b. Die untere Mündung desselben, die sogenannte Dampfdüse, kann durch die Regulirspindel s mehr oder weniger geöffnet werden, indem man mittels des Handrädchens c diese Spindel mehr oder weniger heben kann. Es entsteht hierdurch ein zwischen der Spindel und der Dampfdüse freibleibender Ring, durch welchen der Dampfstrahl in das folgende, etwas weitere Gehäuse, schießt und dadurch Luft mit sich fortreißt, die, wie die Pfeile andeuten, durch seitliche Oeffnungen des Gehäuses herbeiströmt. Dabei erhält diese Luft dieselbe Geschwindigkeit, welche der Dampf nach seiner Expansion in dieser Zwischendüse besitzt, und diese Geschwindigkeit der Luft und des Dampfes wird benutzt, um beim Ueberspringen in die zweite Zwischendüse wieder Luft anzusaugen u. s. w., bis endlich im engsten Theile des Druckconus d die Geschwindigkeit des Gemisches von Dampf und Luft nur noch so groß ist, daß sie dem unter dem Roste zu erzeugenden Drucke entspricht. Mit Hilfe der durch das Handrädchen c zu bewegenden Dampfregulirspindel s hat man es ganz in seiner Gewalt, die Luftmenge, welche angesogen und

unter den Rost gepreßt werden soll, zu reguliren. — Die Fabrik von Gebrüder Körting in Hannover baut außer den Dampfstrahlgebläsen auch Dampfstrahlinjectoren zu Speisen der Dampfkessel mit vorgewärmtem Wasser, Dampfstrahlleckapparate, um Schiffslecke unschädlich zu machen, Elevatoren für Korn, Syrup, Wasser u. s. w., Exhaustoren, Scrubbers und Regenerirgebläse für Gasfabriken, Dampfstrahlventilatoren für Trockenräume und Waggons, Dampfstrahlkohlensäuregebläse u. s. w. für Zuckerfabriken, Zerstäubungs- und Diffusions-Injectoren für chemische Fabriken und zahlreiche andere Strahlapparate.

214 **Ausfluß der Gase.** Ein Gas kann nur dann aus einem Raum in einen anderen fließen, wenn es in dem ersten eine höhere Spannung hat als in dem zweiten, wenn also z. B. ein lufterfüllter Raum mit einem leeren Raume verbunden wird. Die Geschwindigkeit des Ausflusses wird dann durch die bekannte Formel $v = \sqrt{(2gh)}$ berechnet, worin h die Druckhöhe ist, unter welcher das Gas ausströmt, ausgedrückt in der Höhe einer Gassäule von gleicher Dichte, wie das ausströmende Gas sie besitzt. Für Luft, die in den leeren Raum strömt, wird die Druckhöhe bekanntlich gemessen durch eine Quecksilbersäule von 76^{cm} Höhe, also durch eine Luftsäule von $76.10500^{cm} = 7980^{m}$ Höhe, weil die Luft von gewöhnlicher Dichte 10500 mal leichter als Quecksilber ist. Folglich ist die Geschwindigkeit des Ausflusses $= \sqrt{(2.10.7980)} = 400^{m}$, was an die Clausius'schen Angaben über die Geschwindigkeit der Luftmoleküle erinnert. Diese Geschwindigkeit des Ausströmens von Luft in einen leeren Raum gilt aber nur für den ersten Moment, weil nach diesem sich schon Luft in diesem Raume befindet, die einen immer größeren Gegendruck ausübt, so daß die Geschwindigkeit immer kleiner und endlich bei beiderseits gleichem Drucke gleich Null wird. Kennt man die dem äußeren Drucke entsprechende Luftsäulenhöhe h_1, so kann man die Geschwindigkeit nach der Fl. $v = \sqrt{[2g(h-h_1)]}$ berechnen. Für leichtere Gase als Luft muß in der Fl. eine größere Höhe, für schwerere eine kleinere gesetzt werden, und zwar muß diese Höhe der Dichte umgekehrt proportional sein; folglich verhalten sich die Ausflußgeschwindigkeiten verschiedener Gase umgekehrt wie die Wurzeln aus ihren Dichtigkeiten. Hieraus folgt als einfache Umkehrung der Satz, daß die Dichten zweier Gase sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer Ausflußgeschwindigkeiten verhalten. Auf diesen Satz hat Bunsen 1857 in seinen „Gasometrischen Methoden" ein interessantes Verfahren zur Bestimmung der Dichte von Gasen und Dämpfen gegründet.

Die Ausflußmenge in einer Sec. ist auch hier gleich dem Product des Oeffnungsquerschnittes mit der Geschw. $= qv$. Doch findet auch hier eine Contraction statt. Für eine dünne Wand ist der Contractionscoëfficient zwischen 0,5 und 0,6; Buff gibt für denselben folgende durch zahlreiche Versuche bewährte Formel $v = 0{,}626\,(1 - 0{,}789\,\sqrt{h})$; auch hier wächst der Coëfficient für dicke Wände, cylindrische und conische Ansatzröhren; erweitern sich dieselben, so wird er sogar größer als 1, gleich 1,12.

Nach Untersuchungen von O. E. Meyer (1866 und 1873) erfahren die Ausflußgesetze auch hier eine Veränderung, wenn der Ausfluß durch capillare Röhren geschieht (Transpiration), und zwar in derselben Weise wie bei den Flüssigkeiten, so daß auch hier Poiseuille's oder besser gesagt Hagens Gesetz gilt: das durch eine Capillarröhre in 1 Min. ausströmende Gasvolumen ist der 4ten Potenz des Halbmessers der Röhre direct und der Länge derselben umgekehrt proportional und steht im geraden Verhältnisse zur ersten Potenz des Druckunterschiedes. Meyer gelangte zur Auffindung dieses Gesetzes durch seine Versuche über die Reibung der Gase.

215 **Innere Reibung der Gase** (Maxwell 1860, O. E. Meyer 1865—73). Die Verschiedenheit des Ausflusses von Gasen aus Capillarröhren und des Ausflusses aus einer Oeffnung in einer dünnen Wand ist nur dadurch erklärlich, daß in ersterem Falle die Reibung des Gases an den Wänden der Röhre und der inneren schneller strömenden Schichten an den äußeren langsamer bewegten einen Einfluß ausübt. Nach den Untersuchungen von Meyer haftet nun sowohl bei benetzenden Flüssigkeiten als auch bei Gasen an den Gefäßwänden eine dünne Schicht von Flüssigkeit oder Gas, an welcher sich die folgende bewegte Schicht reibt; nach ihm

findet daher keine Reibung der Gase an den Wänden, sondern nur eine innere Reibung der Gase statt. Die allgemeinste und einfachste Erscheinung derselben besteht darin, daß zwei bewegte Gasschichten von verschiedener Geschwindigkeit sich in einer ebenen Trennungsfläche berühren; die Reibung äußert sich dann dadurch, daß die schneller bewegte Schicht verzögert, die langsamer bewegte beschleunigt wird, und die Größe der Reibung wird durch den Druck gemessen, der für sich allein jene Verzögerung hervorzubringen im Stande ist. Die Reibung ist offenbar, wie auch schon Newton für Flüssigkeiten angenommen hat, direct proportional der Größe der Berührungsflächen und der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Schichten; außerdem hängt sie auch von der materiellen Beschaffenheit der Gase ab, ist für verschiedene Gase verschieden groß. Dieser Einfluß der materiellen Beschaffenheit wird durch einen Coëfficient ausgedrückt, den man die Reibungsconstante nennt und mit η bezeichnet; dieselbe ist nach Maxwells und Meyers Theorie unabhängig von der Dichte des Gases, also auch von dem Drucke, unter welchem dasselbe steht, hängt aber von der Temperatur desselben ab, und zwar ist sie der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur direct proportional; endlich ist sie für verschiedene Gase verschieden. Sie bedeutet die verzögernde Kraft, welche eine Schicht von 1^{qcm} Oberfläche ausübt, wenn die Geschwindigkeit derselben um 1^{cm} geringer ist, als die einer um 1^{cm} entfernten Schicht. Meyer bestimmte dieselbe für die Luft aus Transpirationsversuchen Grahams (1846), aus horizontalen Schwingungen horizontal aufgehängter Platten, wie auch Maxwell (1866) gethan hatte, aus eigenen und Bessel'schen Pendelversuchen, endlich aus zahlreichen Ausflußbeobachtungen, und fand sie für Luft = 0,00019, für Sauerstoff = 0,00021, für Wasserstoff, wo sie den kleinsten Werth besitzt, = 0,00009. Diese Zahlen sind deßhalb von besonderem Interesse, weil man mittels derselben die Entfernung der Gasmoleküle von einander, die mittlere Weglänge der Moleküle und die Größe derselben ausrechnen kann.

Die verzögernde und die beschleunigende Einwirkung zweier Gasschichten kann man nach der mechanischen Theorie der Gase folgendermaßen erklären. Wenn zwei ruhende Gasschichten von gleicher Dichte einander berühren, so wird vermöge der molekularen, fortschreitenden Bewegung der Gasmoleküle, die bekanntlich nach allen Richtungen stattfindet, in einer gewissen Zeit eine ebenso große Zahl von Molekülen aus der ersten in die zweite fliegen, als von der zweiten in die erste; dasselbe muß auch stattfinden, wenn die beiden Schichten in Bewegung sind. Nur werden die Moleküle, welche durch ihre molekulare Bewegung schon theilweise die Richtung der Bewegung beider Schichten besitzen, in der schnelleren Schicht eine größere Geschw. haben als in der langsameren; da nun die Moleküle der schnelleren in die langsamere, die der langsameren in die schnellere diffundiren, so werden erstere allmälig die langsamere beschleunigen, letztere die schnellere verzögern. Aus dieser Erklärung erhellt auch sofort, warum die Reibung der Größe der Flächen und der Geschwindigkeitsdifferenz proportional ist. Auch die Unabhängigkeit von der Dichte läßt sich ungefähr einsehen; denn bei z. B. 3facher Dichte mögen wohl 3 mal so viele Moleküle übergehen, sie haben aber auch dann die dreifache Masse zu beschleunigen. Endlich ist auch die Abhängigkeit von der Temperatur ersichtlich; denn bei höherer Temperatur ist die Geschwindigkeit der Moleküle größer, und zwar wächst dieselbe proportional zu der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur, da diese durch die lebendige Kraft $^1/_2 mv^2$ der Moleküle ausgedrückt wird; also muß auch die Wirkung der Reibung jener Größe proportional sein.

Da die Versuchsresultate von den theoretischen Gesetzen mannichfach abweichen, so suchten Kundt u. Warburg (1875) darzuthun, daß die Reibung der Gase keine ausschließlich innere sei, daß es vielmehr auch eine äußere Reibung der Gase gebe, die aus einem Gleiten der Moleküle an den Grenzwänden bestehe; für den Gleitungscoëfficient ergab sich, daß er der Dichte umgekehrt und der mittleren Weglänge der Moleküle direct proportional sei. Als sie den Einfluß der Gleitung aus ihren Versuchsresultaten eliminirten, blieb der Reibungscoëff. der Gase von 750 bis 1^{mm} unabhängig vom Drucke. Kundt stellte hierfür (1876) ein sehr schlagendes Experiment an: über dem Flügelrade eines Radiometers wurde eine leicht drehbare Glimmerscheibe angebracht; war nun das Flügelrad in Rotation versetzt, so fing die Scheibe bald an, in derselben Richtung sich langsam mit zu drehen, was beweist, daß auch in der höchsten Verdünnung die Luftreibung noch beträchlich ist. Crookes sagt zum Verständnisse einer analogen Erscheinung: ein Ballon von $13{,}5^{cm}$ Dm. enthält eine

Quadrillion Gasmoleküle; wird diese Luft millionfach verdünnt, was wir für Luftleere zu halten geneigt sind, so enthält der Ballon immer noch eine Trillion von Molekülen. Auch für Dämpfe verschiedener Art ergab sich die Reibungsconstante als unabhängig vom Druck, wenn auch meist noch kleiner als beim Wasserstoff, so für Alkoholdampf 78, Benzoldampf 76, Aetherdampf 73 Milliontel (Puluj 1878); für sehr starke Verdünnungen gilt nach Puluj das Gesetz der Unabhängigkeit vom Drucke nicht mehr; so soll η, das für die Luft bei 7mm noch 181 Milliontel beträgt, bei 0,03mm nur noch 71 Milliontel betragen, was indeß anzeigt, daß die Reibung doch nur wenig kleiner geworden ist. Auch Kundt und Warburg hatten schon mathematisch gefunden und durch Versuche bestätigt, daß die Unabhängigkeit vom Drucke nur so lange gilt, als die mittlere Weglänge der Moleküle verschwindend klein gegen die Dimensionen des untersuchten Gasraumes ist; sie hatten die Schwingungsmethode angewendet; das logarithmische Decrement war bei jener Voraussetzung constant, nahm aber bei sehr geringer Dichte ab. Lothar Meyer (1878) schloß aus einer Untersuchung im Gegensatze zu den meisten früheren Forschungen, daß für gesättigten Benzoldampf die Constante der Quadratwurzel aus der Spannung proportional sei. Crookes veröffentlichte 1881 seine langjährigen Arbeiten über diesen Gegenstand; er hatte, geleitet von dem Bestreben, seinen ultragasigen Zustand, die strahlende Materie, zu retten, die Versuche für H, O, N, Luft, CO_2 u. CO bis zur Verdünnung von einigen Milliontel at fortgeführt, und fand, daß H dem Maxwell'schen Gesetze am längsten folgt, CO_2 am wenigsten, daß aber bei allen Gasen ungefähr für ein Tausendtel at die Gültigkeit aufhört, und daß bei einigen Milliontel at die Constante sehr rasch abnimmt. Lothar Meyer findet 1882 ebenfalls nach langjährigen Arbeiten, daß die verschiedenen Dämpfe homologer Reihen dieselbe Constante haben. Noch mehr verschieden als für den Druck sind die Versuchsresultate von der Theorie bei dem Einfluß der Temperatur. Während nach der Theorie der Coëff. proportional sein soll zu der Quadratwurzel oder Potenz ½ der absoluten Temperatur, glaubte Maxwell schon aus seinen ersten Versuchen schließen zu dürfen, daß er der absoluten Temperatur selbst, also ihrer Potenz 1 proportional sei. Genauere Versuche von O. E. Meyer (1878) u. A. ergaben, daß die Wahrheit zwischen der theoretischen und Maxwells Angaben liege; für permanente Gase scheint η der Potenz ¾, für coercible der Potenz 0,9 und für Dämpfe fast der Potenz 1 proportional zu sein. Ja Koch fand sogar (1883) für Quecksilberdampf aus Transpirationsversuchen den Exp. = 1,6. Schon Maxwell fühlte sich durch diese Widersprüche bewogen, die Fundamente der kinetischen Gastheorie etwas abzuändern, während O. E. Meyer meint, die Abweichungen rührten davon her, daß in der theoretischen Betrachtung der Radius der Wirkungssphäre der Moleküle nicht richtig erfaßt worden sei. Es sind daher über diesen Gegenstand nähere Forschungen abzuwarten, die von besonderer Bedeutung sind, da aus dem Coëff. η der inneren Reibung die Abstände und Größe der Moleküle berechnet werden. Oefter wurde schon erwähnt, daß der Abstand oder die mittlere Weglänge der Gasmoleküle etwa ein Zehntausendtel mm betrage. Puluj hat (1878) die mittlere Weglänge für verschiedene Gase und Dämpfe neu berechnet und gibt sie in Milliontel Millimetern mit folgenden Zahlen an: Luft 82, Wasserstoff 151, Wasserdampf 58, Alkoholdampf 33, Chloroformdampf 24, Aetherdampf 22; die Moleküle der gesättigten Dämpfe haben also 2 bis 4mal kleinere Abstände als die der permanenten Gase.

5. Molekularwirkungen der Luftarten.

216. **Die Diffusion der Luftarten** (Dalton 1802). Wenn verschiedene Luftarten einander berühren, so bleiben dieselben nicht getrennt wie Oel und Wasser, sondern sie durchdringen sich gegenseitig wie Wasser und Weingeist, so daß in verhältnißmäßig kurzer Zeit ein gleichmäßiges Gemenge der Luftarten entstanden ist. Diese Erscheinung nennt man die Diffusion der Gase. Wir haben schon in 54. aus der neuen Anschauung über das Wesen der Luftarten das Grundgesetz der Diffusion abgeleitet: die *Diffusionsgeschwindigkeit*, also auch das *diffundirte Gasvolumen ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte der Gase*. Dieses Gesetz wurde von Graham 1834 aus Versuchen gefolgert, bei denen sich Gase allerdings nicht direct berührten, sondern durch künstliche Gypsscheiben getrennt waren; für diese Einrichtung kann, wie Bunsen 1858 zeigte, das Gesetz nicht mit Genauigkeit gelten, weil hier die Capillarität des porösen Gypses mitwirkt, eine Erscheinung, die der Endosmose der Gase angehört.

Nach dem angeführten Graham'schen Gesetze hat der Wasserstoff die stärkste Diffusion, 4 mal stärker als die des Sauerstoffs und auch ungefähr als die der Luft; deßhalb dringt

der Wasserstoff auch durch künstliche Zeughüllen, welche so porös sind, daß sie eine directe Berührung der Gase gestatten, mit großer Raschheit, was der Verwendung des Wasserstoffs zu Luftballonen sehr hinderlich ist. — Vermöge der Diffusion der Luftarten hat unsere Atmosphäre überall, in der Tiefe wie in der Höhe, in den gefülltesten Sälen wie in den zugigsten Räumen denselben Procentgehalt von Sauerstoff; vermöge dieser Eigenschaft geht das Kohlendioxyd an die Pflanzen und der durch diese befreite Sauerstoff von denselben weg in die Luft, wodurch die Luft immer von Kohlendioxyd gereinigt und lebensvoll erhalten wird. Doch sinkt dies schwere Kohlendioxyd leicht an die tiefsten Stellen und diffundirt von dort weniger rasch in die Luft hinaus, daher findet es sich häufig in tiefen Brunnen, Gruben u. s. w. — Grahams Gesetz kann auch als eine Folgerung des in 215. gefundenen Ausflußgesetzes verschiedener Gase aufgefaßt werden.

Auch die Diffusion der Gase ist in neuerer Zeit nach der kinetischen Theorie erforscht und durch Versuchsresultate geprüft worden; es ergaben sich auch hier großentheils Uebereinstimmungen der theoretischen und der Versuchsresultate, wodurch die Theorie erneute Bestätigungen gewinnt, jedoch auch wie bei der inneren Reibung Abweichungen, welche uns zeigen, daß die kinetische Gastheorie entweder nicht richtig durchgeführt oder noch nicht völlig genau erkannt wurde. Um die Forschungen über die Diffusion der Gase zu verstehen, müssen zuerst die eingeführten Größen erklärt werden, wofür wir an Daltons Grundversuch der Diffusion anknüpfen. Sind 2 Hohlkugeln durch eine Röhre verbunden, die obere luftleer, die untere gaserfüllt, so dringt das Gas in kürzester Zeit in die obere Kugel ein und erfüllt beide gleichmäßig; genau dasselbe geschieht, wenn die obere Kugel gaserfüllt, die untere luftleer ist. Aber auch, wenn beide Kugeln mit verschiedenen Gasen erfüllt sind, einerlei ob das obere schwerer oder leichter ist als das untere, so breiten sich dennoch beide Gase so aus, daß ein Gemisch von ihnen bald beide Kugeln gleichmäßig erfüllt. Nur geschieht diese Diffusion nicht so schnell, als wenn eine von beiden Kugeln leer ist; jedes Gas setzt daher der Ausbreitung des andern einen Widerstand entgegen, der offenbar der Dichte und molek. Geschw. des Gases proportional ist. In dem Verbindungsrohre aber fließt von beiden Gasen in gleichen Zeiten eine gleiche Menge in entgegengesetzter Richtung; jedes Gas verhält sich abgesehen von dem verzögernden Einflusse des Widerstandes so, als ob es einerseits dem Drucke der Atmosphäre ausgesetzt sei und anderseits in einen leeren Raum fließe, wo ihm kein Gegendruck oder der Druck Null entgegenwirkt. Unter der Diffusionsconstante k versteht man nun das in 1 Sec. durch ein Rohr von 1^{qcm} Querschnitt und 1^{cm} Länge strömende Gasvolumen, vorausgesetzt, daß constant einerseits der Druck der Atmosphäre, anderseits der Druck Null herrscht. Diese Diffusionsconstante ist nach den Ergebnissen der Theorie umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus dem Product der Dichten beider Gase und dem Gesammtdruck derselben, dagegen direct proportional der Potenz $^3/_2$ der absoluten Temperatur (Stefan 1872); die Versuchsresultate Loschmidts (1871) stimmen gut mit den zwei ersten Gesetzen, dagegen ist nach diesen die Diffusionsconstante nahezu dem Quadrat der absoluten Temperatur proportional; dies stimmt mit den neueren Arbeiten über die innere Reibung; denn nach der Theorie soll der Temperatur-Exponent für die Diffusion um 1 größer sein, als der der inneren Reibung; jener ist aber (215.) $^1/_2$ bis $1^1/_2$, also muß dieser $1^1/_2$ bis $2^1/_2$ sein; wirklich fand Obermayer (1880) die meisten Exponenten nahezu $= 2$. Auch fand dieser Forscher 1882 eine Abhängigkeit der Constante von der Diffusionszeit; für kurze Zeiten sei sie klein und nähere sich für wachsende Zeiten immer mehr einem Grenzwerthe; das bestätigte Waitz (1882). Indessen ist doch wenigstens nach Obermayer (1883) die Veränderlichkeit des Coëff. mit der Temp. von der Zeit unabhängig.

217 **Die Lufthaut und die Hauchbilder** (Moser 1829). Jedes Kind entdeckt die Erscheinung der Hauchbilder; man schreibt mit dem Finger auf eine trockene Fensterscheibe, ohne die Züge wahrzunehmen; haucht man sodann auf die Scheibe, so treten die Züge deutlich hervor, und zwar dadurch, daß die unbeschriebenen Stellen durch den Hauch trüber werden als die beschriebenen. Hat man die Scheibe vorher kräftig abgewischt, so tritt die Erscheinung viel schwächer oder gar nicht auf. Aehnliche Erscheinungen zeigen sich, wenn man auf eine frisch polirte Metallplatte einen Stempel mit eingegrabenen oder hervorragenden Zügen, eine Münze oder dgl. legt und nach Wegnahme des Stempels die Platte behaucht oder Quecksilberdämpfen aussetzt. Ja sogar die Züge von Bildern, die lange dicht hinter einer Glastafel lagen, treten später auf der Glastafel hervor.

Moser, der diese Erscheinung zuerst näher untersuchte, erklärte sie irrthümlicher Weise für Folgen eines in allen Körpern vorhandenen latenten Lichtes. Die richtige Erklärung nebst zahlreichen Versuchen zu derselben gab Waidele 1843. Sie beruht auf der Lufthaut, d. i. einer dünnen Schicht von stark verdichteter Luft, von Dämpfen und unendlich feinen

Stäubchen, die sich auf jedem Körper bildet, weil die Luftmoleküle vermöge ihrer molekularen Bewegung ganz in die Nähe der Körper gelangen und dort durch die Anziehung derselben festgehalten werden. Diese Haut ist es, die bei der Anfertigung eines Barometers durch sorgfältiges Auskochen mit Quecksilber von der Innenwand der Röhre entfernt werden muß. Wischt man diese Haut durch Schreiben auf eine Glasplatte weg, so condensiren sich nachher an diesen Stellen mehr Dämpfe, weil diese Stellen mehr Dampf als die übrigen annehmen können; die beschriebenen Stellen sind daher mit einer durchsichtigen Wasserhaut, die anderen mit einzelnen Dunstbläschen bedeckt, wodurch die ersteren weniger trüb als die letzteren erscheinen. Wird eine polirte Metallplatte mit frisch ausgeglühtem Trippel abgerieben, so nimmt dieser die Lufthaut weg; setzt man dann einen Stempel auf die Platte, so theilt sich dessen Lufthaut der Platte durch die Diffusion mit, aber nur an den Berührungsstellen; deßhalb entsteht nachher durch Behauchen ein Bild der Stempelzüge. Ebenso entsteht ein Bild, wenn die Platte nicht geputzt, der Stempel aber abgerieben ist. Sind dagegen beide abgerieben oder beide künstlich mit gleichen Lufthäuten versehen, so entsteht kein Bild. Wenn aber beide längere Zeit gelegen haben und nicht abgerieben werden, so haben sie eine verschiedene Lufthaut; es wird daher auch bei der Berührung die Diffusion gegen einander verschieden sein, es muß ein theilweiser Austausch der Lufthäute an den Berührungsstellen stattfinden, wodurch in diesem Falle schwache Bilder entstehen können. — Besonders merkwürdig sind die elektrischen Hauchbilder (Rieß 1838, Karsten 1842), welche sich an den Stellen bilden, über die ein elektrischer Funke geschlagen ist, oder durch welche Elektricität zur Erde abgeleitet wurde; solche Stellen geben nach Jahren noch Hauchbilder.

218 **Die Absorption der Luftarten.** Nicht blos auf der Oberfläche der Körper befindet sich Luft, sondern die Luftatome dringen auch durch die Poren und die molekularen Zwischenräume in das Innere der Körper ein und haften dort durch die Attraction fest. Diese Erscheinung nennt man die Einsaugung, Verschluckung oder Absorption der Gase. Man kann dieselbe einfach und auffallend zeigen, wenn man in einem umgestülpten Glascylinder über Quecksilber Kohlendioxyd auffängt und dann ein Stück frisch ausgeglühter Kohle in den Raum bringt; das Quecksilber steigt dann rasch in die Höhe. Noch rascher geschieht das Steigen, wenn man Ammoniakgas durch Wasser verschlucken läßt. — *Die Gewichtsmenge des absorbirten Gases ist nach Henry (1803) dem Drucke proportional*, unter welchem das Gas steht. Dann wächst dieselbe, wenn die Temperatur niedriger wird; doch steht sie zu der Temperatur in einem verwickelten Verhältnisse. So gibt z. B. Bunsen (1857) für den Absorptionscoëfficienten des Ammoniaks in Wasser, d. i. für das Gasvolumen, welches von der Volumen-Einheit der Flüssigkeit bei 760^{mm} Luftdruck verschluckt wird, folgende Formel: $1049{,}63 - 29{,}496\,t + 0{,}6769\,t^2$, worin t die Temperatur bedeutet, woraus folgt, daß bei 0^0 das Wasser 1049, bei 20^0 aber nur 731 Volumina Ammoniak verschluckt. Umgekehrt wird durch Verminderung des Druckes die Absorption geringer, worauf das Schäumen von Flüssigkeiten beruht; ebenso durch Erhöhung der Temperatur, weßhalb durch Ausglühen Körper ihre Gase verlieren. — Die Menge des absorbirten Gases hängt auch wesentlich von der Natur des Gases und des absorbirenden Körpers ab. Im Allgemeinen werden Gase um so leichter absorbirt, je leichter coërcibel sie sind; so verschluckt Buchsbaumkohle unter denselben Umständen 90 Volumina Ammoniak, unter denen sie kaum 2 Volumina Wasserstoff aufnimmt; so absorbirt Wasser 1000 Volumina Ammoniak, während es nur 0,02 Volumina Wasserstoff verschluckt. Ueber den Einfluß des absorbirenden Körpers ist noch wenig erforscht; im Allgemeinen scheint die Absorption um so größer zu sein, je geringer die Dichte und je poröser der Körper ist.

So absorbirt Weingeist von allen Gasen ein größeres Volumen als Wasser. Kohle und Platinschwamm verdanken ihrer Darstellungsweise eine starke und feine Porosität; sie absorbiren daher sehr stark. Da nun mit der Absorption eine Verdichtung der Gase, also ein Verlust von Arbeit verbunden ist, so muß bei der Absorption Wärme entstehen; darauf beruht die Anwendung von Platinschwamm im Döbereiner'schen Feuerzeug und die Selbstentzündung manches Haufens poröser Pulverkohle. — Aus der leichteren Absorption coërcibler Gase scheint zu folgen, daß die Gase bei der Absorption flüssig oder gar fest werden. Am deutlichsten zeigen dies die zerfließlichen Salze, wie Chlorcalcium, Soda u. s. w., welche in

dem absorbirten und condensirten Wasserdampf zerfließen, sodann die hygroskopischen Stoffe, wie Haare, Fischbein, Pflanzenfasern, welche durch den absorbirten und condensirten Wasserdampf feucht und schlaff werden. Außerdem nehmen Ammoniak und Salzsäure, die sich schon bei geringerer Compression condensiren, durch die Absorption einen vieltausendfach kleineren Raum ein, wodurch sie ebenfalls flüssig werden müssen.

Wenn nun auch die Absorption von Luftarten durch Flüssigkeiten nahezu denselben Gesetzen folgt, wie diejenige durch poröse feste Körper, so sind dies doch zwei ganz verschiedene Vorgänge; denn die letztere Absorption ist nur ein Eindringen der Luftmoleküle durch Diffusion und das Festhalten derselben durch die Anziehung, während die erstere eine Lagerung der Luftmoleküle in den molekularen Zwischenräumen, eine Art von Auflösung ist. Indessen findet sich auch bei den festen Körpern eine dieser ähnliche Absorption, nämlich die Absorption von Gasen durch Kolloide und durch gluthweiche Metalle, welche in neuerer Zeit von Graham (1867 und 1868) näher untersucht worden ist. Dieser Forscher fand, daß Kautschuk 0,6 seines Volumens Wasserstoff und sein ganzes Volumen Kohlendioxyd aufnimmt; da dieses stattfindet, ohne daß das Volumen des Kautschuk um eine Spur zunimmt, so liegt hier ebenfalls die Vermuthung nahe, daß die Gase durch Absorption flüssig werden. Diese Absorption wird in der Wärme, wodurch der Kautschuk sich mehr dem flüssigen Zustande nähert, größer, woraus sich die Aehnlichkeit dieser Absorption mit der Lösung ergibt. Noch auffallender tritt dies bei den kolloiden Metallen hervor. Bei Grahams Versuchen nahm Platin sein 4faches Volumen Wasserstoff auf, Silber 1—4 Vol. Sauerstoff, Eisen 1/2 Volumen Kohlenoxyd, Palladium sogar über 900 Volumina Wasserstoff. Dies geschah aber nur, wenn den Metallen in glühendem Zustande diese Gase geboten, und wenn sie dann langsam abgekühlt wurden; beim Erhitzen entwichen die Gase wieder. Hierin liegt wieder eine Uebereinstimmung mit der Lösung. Da der Wasserstoff in dem Palladium ein vieltausendmal kleineres Volumen als gewöhnlich hatte, so konnte er unmöglich noch gasförmig, er mußte flüssig sein; dies wird auch noch dadurch bestätigt, daß er in höherer Temperatur wie jede Flüssigkeit rascher verdampfte. Da er endlich nach der Abkühlung selbst im Vacuum nicht entwich, so liegt die Vermuthung sehr nahe, daß er bei niederer Temperatur sogar fest war. So wäre denn Graham das Problem der Condensation des Wasserstoffs, wenigstens einstweilen in einem anderen Körper, gelungen; der flüssige und feste Wasserstoff bildet hier Legirungen mit dem Palladium, was dem sonstigen metallischen Verhalten des Wasserstoffs ganz gemäß ist. Noch besser gelang Graham diese Legirung, als er die elektrische Anziehung statt der Wärme benützte. Er brachte (1860) ein Stück Palladium an den negativen Pol eines Wasserzersetzungsapparates; dann wurde durch die elektrische Anziehung des negativen Palladiums zu dem an sich positiven Wasserstoff die Absorption bedeutend verstärkt, so daß das Palladium sein 800—1000faches Volumen Wasserstoff zu absorbiren vermochte. Graham nannte diesen Wasserstoff, der im Palladium fest vorhanden ist, und der in ähnlicher Weise auch in vielen Palladiumlegirungen und nach Böttger (1874) auch in Nickel, Kobalt und Zinn fest erhalten werden kann, Hydrogenium, und bestimmte das spec. Gew. desselben = 0,8, wodurch abermals der feste Zustand angedeutet wird. Graham hält Hydrogenium für activen Wasserstoff = HHH, wie Ozon activer Sauerstoff ist; die active Eigenschaft zeigt derselbe in seiner stark reducirenden Wirkung; so reducirt er Ferricyankalium, Kaliumnitrat, Ferrisulfat, was der gewöhnliche Wasserstoff nicht thut. Graham beobachtete schon, daß Palladiumdraht beim Hydrogeniren sich stark verlängert und sich, wenn das Hydrogenium durch starkes Erhitzen oder Sprengels Luftsauger entfernt wird, unter seine frühere Länge verkürzt. Böttger beobachtete, daß Blech beim Hydrogeniren sich spiralig krümmt. Das Palladiumblech wird nach Böttger viel stärker hydrogenirt, wenn es vorher mit fein vertheiltem Palladium, mit Palladiumschwarz überzogen wird; ein solches hydrogenirtes Blech entwickelt, wenn es aus der Zersetzungszelle kommt, Gluthhitze, explodirt, wenn es mit Schießwolle umwickelt ist und brennt längere Zeit fort; wird es in Aether getaucht, so steigt der Wasserstoff stürmisch auf. Jedoch geht nicht aller Wasserstoff aus dem schwarzen Blech heraus: während ein blankes Blech, wie Böttger aus einer der Palladium-Hydrogenium-Münzen ersah, die Graham seinen Freunden geschenkt hatte, in wenigen Jahren allen Wasserstoff verliert, fand derselbe ein schwarzes Blech, das den überschüssigen Wasserstoff durch Eintauchen in Aether abgegeben hatte, wenigstens nach 30 Tagen noch stark hydrogenirt. — Glas gehört ebenfalls zu den Kolloiden; seines dichten Stoffes wegen traute man ihm keine Absorption zu. Hannay fand (1881), daß es bei nicht zu hoher Temp., etwa 200°, Gase unter sehr hohem Drucke (200 at) in großer Menge verschlucke und festhalte, wenn die Abkühlung bei gleichem Drucke stattfinde. Bei raschem Schmelzen entweichen dann die Gase unter starkem Schäumen; ebenso diffundiren dieselben durch Glas und ähnliche Stoffe, wenn Druck und Temp. des Absorbirens andauern.

Bergmans „Opuscula“ (1779) enthalten schon die Angabe, daß das sp. G. des mit Kohlendioxyd gesättigten Wassers auf 1,0015 steige; Thomson (1802) gibt an, daß 1 Vo-

lumen Wasser durch Sättigung mit Ammoniak auf $1\frac{1}{3}$, mit Salzsäure auf $1\frac{1}{2}$, mit Chlor auf 1,002 steige. Mackenzie und Nichols (1877) bestimmten genau die Ausdehnung einer Flüssigkeit bei der Absorption von Gasen und fanden, daß sie der absorbirten Gasmenge proportional sei; insbesondere betonten sie, daß durch Absorption von Kohlendioxyd das Wasservolumen soviel zunehme, als das Volumen des zu Flüssigkeit condensirten Kohlendioxyds betrage. Während diese und die erwähnten anderen Thatsachen für Grahams Ansicht zu sprechen scheinen, spricht v. Wroblewski (1879) den Satz aus: die Hypothese von Graham, nach welcher von Kautschuk absorbirte Gase als Flüssigkeit im Kautschuk enthalten seien, ist falsch; nach seinen Versuchen gehen nämlich Gase ganz auf dieselbe Weise durch Kautschuk wie durch eine künstliche Graphitplatte; da nun in dieser ein Flüssigwerden unmöglich angenommen werden kann, sondern die Gaseigenschaften völlig erhalten bleiben, so muß dies auch für die Absorption im Kautschuk gelten. Allerdings scheint gegen Grahams Ansicht auch eine theoretisch-experimentelle Untersuchung von Stefan (1878) zu sprechen, in welcher derselbe den inneren Vorgang der Absorption, das Fortschreiten des absorbirten Gases im Innern von Wasser und Weingeist, die Diffusion der Gase durch diese Flüssigkeiten eingehend prüft. Wie Wroblewski (1878) zeigt St., daß dieser Vorgang eine Analogie mit der Wärmeleitung habe; die Oberflächenschicht sättige sich zuerst mit dem Gase, gebe dann einen Theil desselben an die folgende Schicht ab, nehme aber ebensoviel neu auf u. s. w.; in solcher Weise habe das diffundirende Gas in jeder folgenden Schicht eine geringere Dichte, diese Dichte habe von der aufnehmenden bis zu der auslassenden Schicht ein Gefälle, dem der Diffusionsstrom proportional sei. Der Factor, mit welchem das Gefälle multiplicirt werden muß, um die Gasmenge zu erhalten, die in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit diffundirt, heißt der Diffusionscoëfficient; derselbe ist per Tag und qcm z. B. für Kohlendioxyd und Wasser 1,4, für Kohlendioxyd und Weingeist 2,7. Theoretisch entwickelt und praktisch bestätigt wird das Gesetz, daß die diffundirten Gasmengen sich verhalten wie die Quadratwurzeln der Zeiten und wie die Längen der flüssigen Säulen. Jedoch geschieht die Diffusion durch Flüssigkeiten außerordentlich viel langsamer als durch die Luftarten; so ist der Coëff. der Kohlensäure gegen Wasser 8000 mal kleiner als gegen Luft. Sauerstoff und Stickstoff diffundiren schneller auch in Flüssigkeiten als Kohlendioxyd, und die größte Diffusionsgeschw. kommt dem Wasserstoff zu, was darauf hindeutet, daß den absorbirten Gasen die Gaseigenschaft verbleibt. Das Stefan'sche Gesetz der Zeit hatte Wroblewski (1878) auch für die Absorption von Kohlensäure in Salzlösungen, Glycerin, Oelen und Kolloiden nachgewiesen. Dasselbe Gesetz hatte schon Fick (1856) für die Diffusion von Flüssigkeiten gegen einander und Lösungen theoretisch abgeleitet und Johannisjanz (1877) experimentell bestätigt. Eine interessante Untersuchung über Absorption von CO_2 durch Salzlösungen hat Setschenow (1876) angestellt: Diejenigen Salze, auf welche CO_2 nicht chemisch wirkt, absorbiren dasselbe nach Henrys Gesetz proportional dem Druck, und um so weniger, je concentrirter sie sind; diejenigen aber, die mit CO_2 einen chemischen Proceß eingehen, absorbiren nicht nach Henrys Gesetz, und um so mehr, je concentrirter sie sind; es gibt doch auch Salze, welche theils chemisch, theils physikalisch absorbiren. Indessen hält Setschenow dafür, daß das Wachsen der physikalischen Absorption der ersten Klasse von Salzlösungen bei der Verdünnung mit der Dissociation derselben in Zusammenhang stehe, also auch chemischen Wirkungen zuzuschreiben sei. Auch in der Pflanzen- und Thierphysiologie, wie in der Agriculturchemie scheint allmälig die Erkenntniß durchzudringen, daß nicht blos die Umbildung oder Assimilation der aufgenommenen Nährstoffe, sondern auch deren Aufnahme selbst hauptsächlich in chemischen Vorgängen ihre Erklärung finden, und daß die rein physikalische Absorption nicht die bisher angenommene hohe Bedeutung dabei habe.

219 **Die Endosmose der Luftarten.** Die Luftarten gehen durch dünne Scheidewände wie die Flüssigkeiten; sie zeigen also auch die Erscheinung der Endosmose. Diese Erscheinung ist verschieden nach der Beschaffenheit der Scheidewände. Die Scheidewände können so große Poren haben, daß dieselben mit einander dünne Röhren bilden, durch welche die Gase direct ausströmen können; dann geht die Vermischung der Gase durch Diffusion vor sich; solche Scheidewände sind z. B. Platten von künstlichem Graphit, künstliche Gypsplatten u. dgl. — Viel kleiner schon sind die Poren in thierischen und Pflanzenstoffen, in den meisten Mineralien; denn die Elementargebilde der Natur, die Zellen, Gefäße und Krystallkeime sind meist noch viel kleiner als die feinsten künstlichen Pulverkörner; folglich können durch Scheidewände natürlicher fester Stoffe die Gase nur mit Hilfe eines äußeren Druckes oder der capillaren Anziehung der Porenwände gehen. Am kleinsten sind die Poren der Kolloide und der Kolloidmetalle; ihre Poren sind nur die molekularen Zwischenräume; durch

solche Scheidewände können Gase nur dringen, wenn sie sich in den Scheidewänden auflösen und auf der anderen Seite verdunsten.

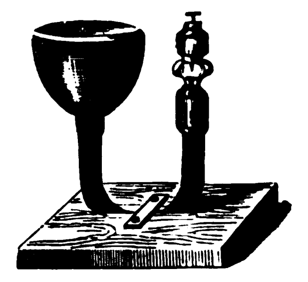
Da die Osmose durch künstliche Scheidewände nur eine Diffusion ist, so müßte sie eigentlich nach Grahams Gesetz, also umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte geschehen, Wasserstoff müßte 4 mal schneller als Sauerstoff und 5 mal schneller als Kohlendioxyd durchgehen. Nach den eingehenden Untersuchungen von Bunsen (1857) gilt aber dieses Gesetz nicht genau, weil die Porenwände einen capillaren Einfluß auf die Gase ausüben, der auch durch den von Meyer entdeckten veränderten Ausfluß der Gase durch Capillarröhren angezeigt wird, sondern nur mit einer entfernten Annäherung, so daß die leichten Gase doch immer schneller durchgehen als die schwereren. Diese Eigenschaft springt durch Versuche mit dem Apparat (Fig. 132) deutlich in die Augen; derselbe besteht aus einer auf eine lange Trichterröhre gekitteten porösen Thonzelle, über welche eine Glasglocke mit einem Gaszuleitungsrohr gestülpt wird, während die Röhre in ein mit gefärbter Flüssigkeit gefülltes Glasgefäß tief herabgeht, aus dem sich ein Spritzrohr erhebt. Ist die übergestülpte Glocke mit Wasserstoff gefüllt, so diffundirt derselbe in größerer Menge durch die Thonzelle in die Trichterröhre, als die Luft heraus diffundirt; die Gasmenge und deren Spannung über dem Wasser steigen demnach und treiben einen Wasserstrahl aus dem Gefäße. Ist jedoch die Glocke mit Kohlensäure gefüllt, so dringt diese in geringerer Menge ein, als die Luft herausdringt, die Gasmenge und deren Spannung über dem Wasser mindern sich, und die Flüssigkeit steigt in der Trichterröhre rasch in die Höhe. Der Apparat zeigt entsprechend der Diosmose der Flüssigkeiten, daß auch bei den Gasen die Osmose von beiden Seiten her stattfindet. Auf der raschen Exosmose des Wasserstoffs beruht die Gefährlichkeit der Wasserstoffballone; eine interessante Anwendung ist Ansells Wetter-Indicator (1868), Fig. 133. Durch die poröse Thonplatte des Gefäßes dringt das leichte Grubengas der schlagenden Wetter rasch ein und hebt daher das Quecksilber in dem anderen Schenkel des Apparates; durch die auf solche Art beförderte Berührung des Quecksilbers mit der Schraubenspitze wird ein elektrischer Strom geschlossen, der eine telegraphische Schelle in Bewegung setzt.

Fig. 132.



Auch kolloide Scheidewände werden am leichtesten und schnellsten von den leichtesten Gasen durchdrungen, weil das Gas an die Scheidewand heran und von dieser wegdiffundiren muß; so dringt durch glühendes Palladium und Platin am meisten Wasserstoff. Indessen gilt diese Regel keineswegs allgemein, weil eben das Durchdringen der kolloiden Wände nur ein Verdunsten des eingedrungenen und gelösten Gases ist, und weil die Lösung in noch unbekannter Weise auf einer Art von chemischer Anziehung beruht. So geht z. B. durch Kautschuk mehr Kohlendioxyd als Wasserstoff, aber doch nur 2 mal soviel, während Kautschuk 20 mal soviel Kohlendioxyd als Wasserstoff absorbirt, was sich dadurch erklärt, daß der Wasserstoff beiderseits 5 mal schneller diffundirt als Kohlendioxyd; so geht durch Kautschuk mehr Sauerstoff als Stickstoff, trotzdem der Sauerstoff schwerer als Stickstoff ist, welche Eigenschaft benutzt werden kann, durch öftere Kautschuk-Endosmose aus der atmosphärischen Luft eine sauerstoffreichere, wenn auch nicht ganz stickstofffreie Luft zu erzeugen; v. Wroblewski (1876) erklärt dies als eine Consequenz des Gesetzes von Henry, das nach seinen Untersuchungen auch für die Diffusion der Gase durch absorbirende Substanzen gilt. — Eisen läßt viel mehr Kohlenoxyd als Wasserstoff durch, obwohl das erstere Gas schwerer ist als das letztere; vielleicht wirkt hier die Verwandtschaft des Eisens zum Kohlenstoff mit, und wahrscheinlich beruht die Stahlbereitung auf der Durchdringung des Eisens mit Kohlenoxyd, welches durch Abgabe von Kohlenstoff an das Eisen zu Kohlendioxyd wird, das dann entweicht. Daß Palladium, Platin u. s. w. nur in glühendem Zustande durchdringlich sind, beruht wohl nicht allein darauf, daß die Diffusion der Flüssigkeiten in der Hitze größer wird

Fig. 133.



und daß die Verdunstung mit der Hitze zunimmt, sondern wohl hauptsächlich auf dem Festwerden der absorbirten flüssigen Gase bei niederer Temperatur. — Exner hat (1874) die Diffusion der Dämpfe durch Seifenblasenlamellen untersucht und gefunden, daß sie dem Absorptionscoëff. direct und der Quadratwurzel aus der Dichte umgekehrt proportional ist, sich also an das Diffusionsgesetz der mechanischen Wärmetheorie anschließt, während Wranghe (1877) für Leinöllamellen ähnliche Abweichungen constatirt wie Bunsen für poröse Diaphragmen.

220 Aufg. 346. Wie groß ist in einer vollkommenen Luftpumpe die Dichte der Luft nach 10 Zügen, wenn die Volumina des Stiefels und des Recipienten bezüglich 2 und 3^{cdm} sind? Aufl.: 0,006046 oder $4{,}595^{mm}$. — A. 347. Wie viel Züge sind nöthig, um mit dieser Pumpe die Verdünnung auf 1^{mm} zu bringen? Aufl.: 13. — A. 348. Wie groß ist der Stiefel, wenn durch 2 Züge die Luft in einem 4^{cdm} großen Recipienten auf $^1/_3$ der Dichte gelangt? Aufl.: $2{,}9284^{cdm}$. — A. 349. Welchen Inhalt hat das Verbindungsrohr, wenn der Stiefel und der Recipient bez. 1 und 2^{cdm} groß sind und die Verdünnung nach 4 Zügen $^1/_4$ beträgt? Aufl.: $0{,}4^{cdm}$. — A. 350. Wenn diese Pumpe zu Compression verwendet wird, wie groß ist die Verdichtung nach 4 Zügen? Aufl.: 4. — A. 351. Mit welcher Geschw. strömt Wasserstoff in einen luftleeren Raum? Aufl.: 1520^m. — A. 352. Welche Geschw. besitzt Luft von 3^{at} Spannung, wenn sie in die Atm. strömt? Aufl.: 692^m. — A. 353. Welche Luftmenge strömt in 1 Min. durch 1^{qdm} aus bei gleichbleibendem Druck von 1^{at} einerseits und gleichbleibender Leere anderseits? Aufl.: $203{,}4^{cbm}$ (Contraction mitgerechnet). — A. 354. Welche Geschw. muß ein Körper besitzen, damit er einen für kurze Zeit luftleeren Raum hinter sich zurücklasse? Aufl.: Etwas über 400^m.

Zweiter Theil der Physik.

Die Lehre von der Molekular=Bewegung oder die engere Physik.

Vierte Abtheilung.

Die Molekular=Bewegung im Allgemeinen oder die Wellenbewegung.

Die Wasserwellen (Gebrüder Weber 1826). Unter Wellenbewegung versteht man jede hin= und hergehende oder Schwingungsbewegung der Moleküle oder der Theilchen eines Körpers. Die Moleküle können zwar noch andere, als Schwingungsbewegungen vollbringen, wie z. B. rotirende Bewegungen um ihre Achsen, fortschreitende Bewegungen u. A. Indessen sind die Schwingungsbewegungen weitaus überwiegend zu nennen. Der Ausdruck Wellenbewegung ist von der bekannten Erscheinung auf Flüssen, Seen und Meeren hergenommen, daß die Oberfläche dieser Gewässer sich in krummlinigen Formen auf= und niederbiegt, wenn auf dieselben eine Kraft stoßend oder drückend einwirkt. Die Erhebung über das Niveau wird Wellenberg, die Vertiefung unter dasselbe Wellenthal genannt; Wellenberg und Wellenthal neben einander bilden eine ganze Welle. Die Höhe des Berggipfels über dem Niveau und die Tiefe der Thalsohle unter demselben geben zusammen die Höhe der ganzen Welle; die Entfernung des Anfanges des Wellenberges, wo derselbe aus dem Niveau heraustritt, bis zu dem Ende des Wellenthales, wo dasselbe wieder in das Niveau eintritt, nennt man die Wellenlänge. 221

Die Wellenbewegung des Wassers besteht aus einer auf= und abgehenden Schwingungsbewegung der Wassertheilchen. Weil in der Wellenbewegung ein Berg an einer Stelle verschwindet und gleich daneben an der Stelle eines Thales wieder auftaucht, so erscheint einer oberflächlichen Betrachtung die Wellenbewegung als ein Fortrücken der ganzen Wassermasse des Berges an die Stelle des Thales, also demnach als eine wagrechte Bewegung der Wassertheilchen. Dies ist aber nur ein Schein, wie schon ein Stückchen Holz auf wellenbewegtem Wasser lehrt; dasselbe geht nicht mit dem Berge an die neue Stelle desselben wagrecht fort, sondern schaukelt hauptsächlich auf und nieder von Berg zu Thal, von Thal zu Berg. Es läßt sich aber auch leicht zeigen, daß eine solche auf= und abgehende Bewegung der Wassertheilchen die Wellenform erzeugt.

Es seien 1, 2, ... 8 (Fig. 134) 8 gleich weit von einander entfernte Theilchen einer Wasserfläche, welche eine identische auf- und abgehende Schwingungsbewegung von elliptischer (grad- oder kreisliniger) Bahnform vollbringen mögen, und zwar der Art, daß die Theilchen nicht gleichzeitig ihre Bewegung beginnen, sondern in gleichen Zwischenzeiten nach einander. Dann müssen, wenn

Fig. 134.



das Theilchen 1 wieder in seine ursprüngliche Lage gelangt ist, also eine ganze Schwingung vollendet hat, die folgenden Theilchen bezüglich $^7/_8$, $^6/_8$ . . . . ihrer Bahn durchlaufen haben, sich also zu derselben Zeit in 2′, 3′ . . . . u. s. w. befinden, während das Theilchen 9 noch ganz in Ruhe ist; die Zwischentheilchen werden Zwischenlagen einnehmen. Verbindet man die neuen Lagen der Theilchen durch eine zusammenhängende Curve, so springt die Wellenform derselben sofort in die Augen. — Auch mittels Eisenlohrs Wellen-Apparat oder mit Fessels Wellenmaschine (Fig. 135) läßt sich zeigen, daß eine Reihe nach einander schwingender Theilchen eine Wellenform bildet.

Fig. 135.



Hiermit ist indeß nur gezeigt, daß durch die Schwingungsbewegung die Wellenform entstehen kann, nicht aber, daß die Wasserwellen wirklich aus schwingenden Theilchen bestehen. Die Gebrüder Weber haben (1825) dies nachgewiesen, indem sie in einer aus Glastafeln gebildeten Wellenrinne dem Wasser Bernsteinkörnchen beimengten und die Bewegungen derselben beobachteten. Sie fanden, daß die Bewegungen der oberen Theilchen aus elliptischen Schwingungen bestehen, daß die senkrechte Achse dieser Ellipsen nach der Tiefe zu immer kleiner wird, und daß endlich etwa in der hundertfachen Tiefe der Wellenhöhe die Wassertheilchen nur wagrecht hin- und hergehen.

Schließlich geht aber auch aus der Entstehung der Wellenbewegung hervor, daß die Wassertheilchen eine auf- und abgehende Bewegung hierbei vollziehen müssen. Wellen entstehen nämlich durch einen Druck oder Stoß auf die Oberfläche des Wassers, wie ihn der Wind oder ein fallender Körper ausübt; nachahmen läßt sich diese Erzeugung von Wellen am reinsten, wenn man aus einer Flüssigkeit mittels einer Röhre eine Säule auffangt und dieselbe dann wieder sinken läßt. Das Wasser erfährt in solchen Fällen an einer Stelle einen größeren Druck als vorher; dieser pflanzt sich nach allen ringsum liegenden Stellen in gleicher Weise fort und zwar in der Richtung von unten nach oben, wodurch das Wasser ringsum steigen muß, ebenso wie in communicirenden Röhren das Wasser in dem einen Schenkel sofort steigt, wenn auf das Wasser im anderen Schenkel ein größerer Druck ausgeübt wird. Im ersten Moment der Wellenbewegung sind also die Theilchen der gedrückten Stelle im Niedergehen und bilden ein Wellenthal, die Theilchen rings um dieses Thal dagegen sind im Aufsteigen und bilden einen ringförmigen Wellenberg. Dieser Berg aber wird durch seine Schwere niedergezogen; die aufwärtsgerichtete Geschwindigkeit wird daher immer kleiner, wird endlich gleich Null und weicht einer durch die Schwere erzeugten abwärts gehenden Bewegung. Im Niveau angekommen, können die Theilchen nicht plötzlich zur Ruhe gelangen; sie müssen vielmehr nach dem Gesetze der Trägheit unter das Niveau herabgehen, wodurch im zweiten Moment an der Stelle des Ringberges ein Ringthal entsteht, während rings um dasselbe durch den hydrostatischen Druck der herabgehenden Theilchen dieses Thales sich ein Wellenberg bildet. Dieser zweite Ringberg sinkt im dritten Moment und wird zu einem Thale, erzeugt aber ebenso in demselben Augenblicke rings herum einen dritten Wellenberg. In solcher Weise pflanzt sich die ursprüngliche Arbeit in immer weiteren ringförmigen Thälern und Bergen von dem Anfangspunkte nach außen fort; die Tiefen und Höhen derselben müssen immer kleiner werden, da dieselbe Arbeit sich auf eine immer größere Masse verbreitet; endlich werden die Höhen verschwindend klein und die Wellenbewegung ist zu Ende. Diese Erklärung zeigt nicht nur die auf- und abgehende Bewegung der Theilchen, sondern läßt auch erkennen, daß durch den seitlichen Druck der Wassertheilchen, wie durch die schiefen Ebenen der Berge eine seitliche Bewegung entsteht, die sich mit der ersteren zu einer krummlinigen Bewegung combinirt. Diese besteht nur dann aus geschlossenen Curven, wenn an einer und derselben Stelle die Wellen sich mit gleichen Dimensionen öfter wiederholen; werden aber die Wellen immer kleiner, so ist die Curve eine elliptische Spirale.

222 **Eigenschaften und Dimensionen der Wasserwellen.** 1. Die Wellenlänge ist gleich dem Wege, um welchen sich die Schwingungsbewegung fortpflanzt, während ein Theilchen eine Schwingung vollzieht.

Denn jedes folgende Theilchen einer Welle beginnt seine Schwingung später als das vorhergehende; dadurch hat jedes Theilchen eine andere Lage, und dadurch hat die Welle an jeder anderen Stelle eine andere Richtung. Die Richtung und Form des Anfanges der Welle wiederholt sich erst da, wo ein Theilchen genau dieselbe Bewegung zu derselben Zeit vollbringt wie das erste Theilchen; also beginnt eine neue Welle an dem Punkte, bis zu welchem die Bewegung fortgeschritten ist, wenn das erste Theilchen seine Schwingung vollendet hat. Hieraus ergeben sich noch folgende zwei Sätze:

2. Theilchen, die um eine oder mehrere ganze Wellenlängen oder, was dasselbe ist, um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, stimmen in ihrer Schwingungsbewegung ganz überein, haben dieselbe Richtung, dieselbe Geschwindigkeit und denselben Abstand von der Ruhelage; sie befinden sich in gleichen Schwingungsphasen. 3. Theilchen, die um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind (wie z. B. 1 und 5, 2 und 6 in Fig. 134), befinden sich in entgegengesetzten Schwingungsphasen.

Eine Wellenbewegung, wie wir sie bisher betrachtet haben, in welcher also die schwingenden Theilchen nach und nach in Bewegung versetzt werden, wird eine *fortschreitende* Wellenbewegung genannt. Wenn dagegen alle Theilchen gleichzeitig ihre Bewegung beginnen und vollenden, so nennt man diese Bewegung eine *stehende* Wellenbewegung. In beiden Erscheinungen können die Schwingungen *transversal* oder *longitudinal* sein, d. h. auf der Richtung der Fortpflanzung der Bewegung senkrecht stehen oder mit dieser Richtung parallel sein; die Richtung der Fortpflanzung ist gewöhnlich auch eine Hauptrichtung des schwingenden Körpers, z. B. eine Richtung der Oberfläche des Wassers. — Außer der Wellenlänge und der Wellenhöhe, welche gleich der Entfernung der höchsten Lage eines Theilchens von seiner tiefsten, gleich der *Schwingungsweite* oder *Oscillations-Amplitude* ist, gehört noch die *Fortpflanzungsgeschwindigkeit*, d. i. der Weg, um welchen sich die Bewegung in einer Secunde fortpflanzt, zu den Hauptdimensionen der Wellenbewegung; dieselbe ist nicht zu verwechseln mit der *Oscillationsgeschwindigkeit*, d. i. mit der Geschwindigkeit der einzelnen schwingenden Theilchen; statt dieser kann man auch die Schwingungszeit oder Schwingungsdauer betrachten, d. i. die Zeit für einen Umlauf eines Theilchens; denn dieselbe steht bei gleichen Schwingungen in umgekehrtem Verhältnisse zu der Schwingungsgeschwindigkeit.

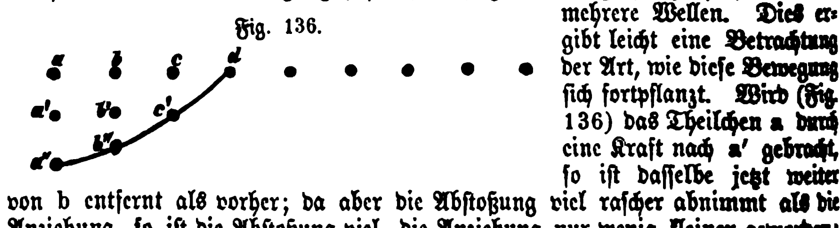
Ueber den Zusammenhang dieser Dimensionen bei den Wasserwellen ergibt sich Folgendes: Je stärker der wellenerzeugende Stoß ist, desto weiter wird sich der hydrostatische Druck fortpflanzen; demnach müssen Wellenlänge und Fortpflanzungsgeschwindigkeit mit einander wachsen. Bei stärkerem Stoße wird außerdem die Stoßgeschwindigkeit der schwingenden Theilchen größer; sie erheben sich aber auch zu größerer Höhe; gerade deßhalb aber summirt sich zu der größeren Stoßgeschw. eine größere Fallgeschw., wodurch die mittlere Schwingungsgeschw. mehr wächst als die Wellenhöhe; die Schwingungszeit nimmt folglich weniger zu als Wellenlänge und Wellenhöhe. Da sich demnach in wenig zugenommener Zeit die Bewegung auf eine stärker gewachsene Strecke fortpflanzt, so wird die Fortpflanzungsgeschw. größer; sie wächst bei stärkerem Stoße mit der Wellenlänge und der Wellenhöhe. Die Fortpflanzungsgeschw. der Wasserwellen wächst mit der Höhe derselben; hohe Wellen laufen schneller als niedrige; wirft man in die äußersten Kreise eines Wasserwellensystems einen Stein, so schreiten die neuen Kreise rascher fort als die vorigen. Einen kaum merklichen Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschw. hat die Natur der Flüssigkeit; denn ebenso vielmal, als sich durch das größere Gewicht einer dichteren Flüssigkeit die fortpflanzende Kraft vergrößert, ebenso vielmal vergrößert sich auch die zu bewegende Masse. Größer dagegen ist der Einfluß der Tiefe der Flüssigkeit; in tiefem Wasser ist die Geschw. der Wellen größer als in flachem, ohne indessen der Tiefe direct proportional zu sein; die Ursache dieser Verzögerung liegt in der Reibung und in der Adhäsion des Wassers gegen den Boden, welche deßhalb einen Einfluß auszuüben vermag, weil sich die Bewegung der Wassertheilchen bis in die 350fache Tiefe der Wellenhöhe fortpflanzen kann. Wegen der Verzögerung der Wellen

an Untiefen und nach den Ufern zu werden die vorausgehenden von den folgenden eingeholt und dadurch erhöht; auch vereinigen sich zurückgeworfene Wellen mit den ankommenden. So entstehen sehr hohe Wellen, deren Schlag man die Brandung nennt. Während auf offenem Meere, wie in der Ostsee, die Wellenberge nur 2—3m Höhe haben und im Weltmeere höchstens 10m Höhe erreichen, gehen sie an Küsten bis auf 20m, ja der 40m hohe Leuchtthurm auf dem Eddystone wird bei besonders stürmischem Wetter durch Wellen um seine eigene Höhe überstiegen. Geht der Wind über eine gewisse Stärke hinaus, so verhindert sein Druck das Aufsteigen der Berge, die Wellen werden daher niedriger, steigen aber bei dem Nachlassen des Druckes um so höher auf, welche Erscheinung die Seefahrer hohle See nennen. — Die Geschwindigkeit der Meereswellen beträgt 10 bis 30m; daher kommen Meereswogen oft eher am Ufer an als der Wind, der sie erzeugte, ja ohne von dem Winde gefolgt zu werden. Nach Bertin (1873) und Saint-Benant (1871) ist das Maximum der Meereswellengeschw. 15 Knoten per Stunde, das Max. der halben Schwingungszeit 12″, der halben Wellenlänge 450m, der halben Wellenhöhe 8m. Einige geben für die Geschw. die Fl. $v = \sqrt{gh}$, die Laroche (1876) für einen langen, gleichförmigen Kanal mit horizontaler Basis entwickelte, Andere für das offene Weltmeer $v = \sqrt{(gL/\pi)}$, von welcher Fl. nach Cousin die Resultate der Beobachtungen im chinesischen Meere (1876) höchstens um 6—8 Procent abweichen; diese Beobachtungen ergaben L = 15 bis 30m, t = 2 bis 3″, v = 7 bis 10m.

Außer der gewöhnlichen, oscillirenden Wellenbewegung des Wassers, deren Gegenbild uns am deutlichsten in einem wogenden Aehrenfelde entgegentritt, gibt es noch mehrere Arten von Wasserwellen: 1. Die Kräuselung, eine meist rasch vorübergehende, leichte Ein- und Ausbiegung der glatten Wasserfläche, oft mit kammförmigen Bergen, die ihr Gegenbild in den kammförmigen Wellen des Flugsandes finden; sie entsteht vorzüglich bei wagrechten, auf dem Wasser sich reibenden, leichten Winden und tritt auch auf Wellenbergen ein. Dadurch gibt sie dem Winde einen Anhalt zur Vergrößerung der Berge. Durch eine Oelschicht wird sie beseitigt, worauf der besänftigende Einfluß des Oeles auf die Meereswellen beruht. 2. Die Transmissionswelle, die sich in Kanälen, wo man sie durch Zugießen oder Wegnehmen von Wasser erzeugen kann, fast ungeschwächt Meilen weit fortpflanzt; den holländischen Trekschuiten geht sie voraus und zeigt deren Ankunft an. Sie besteht aus einer mehr wagrechten Bewegung der Wassertheilchen. Aehnlich ist die Fluthwelle, sowie 3. der Schwall (swell). Derselbe besteht aus einem oder mehreren weit durch das Meer fortgehenden Wasserdämmen von 4—5m Höhe, die durch Thäler von 100 und mehr Meter Breite von einander getrennt sind. Regelmäßige Schwalle entstehen durch lange nach derselben Richtung wehende Winde und durch Meeresströme, unregelmäßige durch Wirbelstürme und Erdbeben; ein solcher Erdbebenschwall geht, wie 1868, den ganzen großen Ocean hindurch. 4. Die Bachwellen, welche von periodischer Ab- und Zunahme der Geschwindigkeit des Fließens herrühren und auch in Stromschnellen auftreten.

223 **Wellen durch Elasticität.** Wie die Flüssigkeiten durch den hydrostatischen Druck und die Schwerkraft in Schwingungen gerathen, so können auch die größeren oder kleineren Theile aller Körper durch eine äußere Kraft und durch die Elasticität in Schwingungen versetzt werden. Auch diese Bewegung wird Wellenbewegung genannt; denn auch hier bildet eine ursprünglich gerade Reihe von Molekülen, wenn das erste derselben durch eine Kraft aus der Reihe getrieben wird, und wenn die Bewegung sich auf die folgenden fortgepflanzt hat, eine oder mehrere Wellen. Dies ergibt leicht eine Betrachtung der Art, wie diese Bewegung sich fortpflanzt. Wird (Fig. 136) das Theilchen a durch eine Kraft nach a′ gebracht, so ist dasselbe jetzt weiter

Fig. 136.



von b entfernt als vorher; da aber die Abstoßung viel rascher abnimmt als die Anziehung, so ist die Abstoßung viel, die Anziehung nur wenig kleiner geworden; folglich wird b von a′ jetzt stärker angezogen als vorher; da es aber auch von c angezogen wird, so muß es sich nach b′ hin bewegen, während a weiter nach a″ geht; b′ wirkt nun ebenso auf c und zieht mit d zusammen c nach c′ herab, während a″ in Gemeinschaft mit c′ ebenso auf b′ wirkt, wie a′ und c vorher auf b gewirkt haben, wodurch b′ nach b″ gelangt. Es ist leicht ersichtlich, daß

a'', b'', c' und d auf diese Weise schon ein halbes Wellenthal bilden; verfolgt man die Bewegung in dieser Weise weiter fort, wenn a'' in die Lage a zurückkehrt, über diese hinausgeht und endlich wieder nach a zurückkommt, so findet man, daß während dieser Zeit sich eine vollständige Welle gebildet hat. Es entsteht also auch hier eine fortschreitende, transversale Wellenbewegung, für welche ebenfalls der Satz gilt, daß die Wellenlänge gleich dem Wege ist, um welchen sich die Bewegung während einer Schwingungszeit fortgepflanzt hat. Am einfachsten lassen sich die Elasticitätswellen an einem Kautschukschlauche zeigen, der mit Sand angefüllt und dessen oberes Ende an der Zimmerdecke befestigt ist; bewegt man das untere Ende hin und her, so entsteht während dieser Schwingungszeit eine Welle, wodurch das Gesetz der Wellenlänge nachgewiesen ist; leicht ist auch das Gesetz der gleichen und entgegengesetzten Phasen an dem Schlauche zu beobachten. Werden die Theilchen durch die Kraft in der Richtung der Molekülreihe voranbewegt, wie es bei longitudinalen Schwingungen der Fall ist, so findet bei dem Voranschreiten der Theilchen eine Verdichtung, bei dem Rückgange über die Gleichgewichtslage hinaus eine Verdünnung statt; hier fehlt zwar die Wellenform, sie entspricht aber doch, wie wir später zeigen werden, dem inneren Vorgange der Bewegung; man nennt diese Bewegung daher doch Wellenbewegung, und Verdichtung und Verdünnung zusammen eine Welle, für welche die Gesetze der Wellenlänge und der Phasen ebenfalls Geltung haben.

Beziehungen zwischen den Größen der Wellenbewegung elastischer Körper. 224
1. Die Wellenlänge sei $= l$, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $= c$, die Schwingungsdauer $= T$, die Zahl der Schwingungen in 1 Sec., kurz die Schwingungszahl genannt $= n$, so ist $T = {}^1/n$ Secunde. Da die Wellenlänge l gleich dem Wege ist, den die Bewegung in der Zeit T zurücklegt, so bestehen die wichtigen Beziehungen $l = cT$ und $l = c/n$ oder $c = nl$ oder $n = c/l$ . . . . . (25) Grundformeln der Wellenbewegung, durch welche man aus der Schwingungszahl und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Wellenlänge (und umgekehrt) berechnen kann.

2. Ebenso wichtig ist eine Beziehung zwischen dem Wege s, um welchen sich ein schwingendes Theilchen aus seiner Gleichgewichtslage entfernt hat, und welchen man Elongation nennt, und zwischen der Zeit t, die für diesen Weg nöthig war, und die man Phasenzeit genannt hat, sowie eine Beziehung zwischen der Schwingungsgeschwindigkeit x in dieser Phase und der Phasenzeit t.

Da bei den Elasticitätswellen die zurückführende Kraft dem Abstande proportional ist, so gilt für dieselben die S. 144 abgeleitete Fl. (21) für die Schwingungszeit $t = \pi \sqrt{(m / k)}$. Bei dem Pendel, wo diese Fl. entwickelt wurde, versteht man unter Schwingungszeit die Zeit einer einfachen Schw., in der Wellenlehre aber die Zeit eines Hin- und Hergangs, einer Doppelschwingung. Außerdem bedeutet in der Wellenlehre k die Kraft, die auf die Masse 1 wirkt. Wenn wir in obiger Fl. die rechte Seite verdoppeln und 1 statt m setzen, so erhalten wir die Schwingungszeit

$$T = 2\pi/\sqrt{k} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (26).$$

Fig. 137.

Die Elongation s und die Geschw. v erhalten wir mittels Fig. 137; denn $s = r \cos(90 - \alpha) = r \sin \alpha$ und $y = r \sin(90 - \alpha) = r \cos \alpha$. Dieses y kommt aber auch in III. 137. vor, woraus $v = y\sqrt{k}$; also ist $v = r\sqrt{k} . \cos \alpha$. Aus den zwei Werthen für s und v ist jetzt noch der Winkel α zu beseitigen und durch t zu ersetzen. Nach der Entwicklung in 137. ist der Bogen $A = rt\sqrt{k}$; da derselbe auch $= r\alpha$ ist, so entsteht $r\alpha = rt\sqrt{k}$, woraus $\alpha = t\sqrt{k}$. Demnach ist $s = r \sin t\sqrt{k}$ und $v = r\sqrt{k} \cos t\sqrt{k}$. Mittels Fl. (29) kann hieraus noch k eliminirt werden, da nach derselben $\sqrt{k} = 2\pi/T$. Setzen wir dies ein, so ergibt sich

$$s = r \sin(2\pi\, t/T) \text{ und } v = r(2\pi/T) \cos(2\pi\, t/T) = u \cos(2\pi\, t/T) \quad \ldots\ldots \quad (27).$$

Denn die Gl. $v = y\sqrt{k}$ heißt für den Punkt α, wo die Maximalgeschw. u herrscht, $u = r\sqrt{k} = r(2\pi/T)$, so daß man für den letzten Ausdruck u setzen kann.

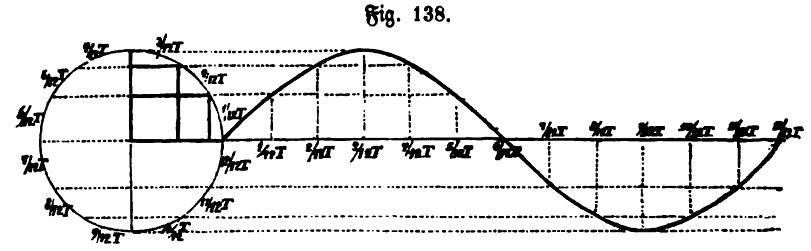
Die beiden Fln. (27) geben uns ein vollkommenes Bild der Schwingungsbewegung;

denn setzen wir für die Phasenzeit die in der folgenden Reihe angegebenen Werthe, so ergeben sich für die Elongation und die Geschwindigkeit immer die unter den Werthen stehenden Größen, aus denen die hin- und hergehende Bewegung zu erkennen ist.

Ist $t =$	0	$^1/_1T$	$^1/_2T$	$^3/_4T$	T	$^5/_4T$	$^3/_2T$	$^7/_4T$	$2T$	$^9/_4T$	$^5/_2T$	$^{11}/_4$	$3T$
so ist $s =$	0	r	0	−r	0	r	0	−r	0	r	0	−r	0
und $v =$	u	0	−u	0	u	0	−u	0	u	0	−u	0	u.

Auch läßt sich hieraus eine graphische Darstellung der Schwingungsbewegung gewinnen, welche die innere Uebereinstimmung derselben mit der Wellenbewegung des Wassers sofort ins Auge springen läßt. Trägt man nämlich die 12 Theile von T als Zwölftel eines Kreisumfanges (Fig. 138), dessen Radius = r ist, auf, so geben die Sinusse der Bogen, d. i. die betreffenden senkrechten Halbsehnen die Elongationen und die Cosinusse d. i. die

Fig. 138.



wagrechten Halbsehnen die Geschwindigkeiten an. Wenn man nun die Zeiten auf einer Verlängerung des wagrechten Durchmessers aufträgt, an den einzelnen Punkten Lothe gleich den senkrechten Halbsehnen errichtet und die Endpunkte derselben verbindet, so entsteht eine Wellenlinie als Darstellung der Schwingungsbewegung. Wenn demnach bei der transversalen Schwingungsbewegung im Inneren eines Mediums oder bei der longitudinalen Wellenbewegung im Allgemeinen die Wellenform auch gar nicht vorkommt, so entspricht sie doch dem inneren Wesen dieser Bewegungen; es dürfen daher die Eigenschaften der letzteren aus denen der förmlichen Wellenbewegung geschlossen werden und der Name Wellenbewegung erscheint demzufolge auch für jene gerechtfertigt.

225 Die Fl. (26) $T = 2\pi/\sqrt{k}$ enthält nicht die Amplitude r; folglich ist die Schwingungszeit von der Amplitude unabhängig, ähnlich wie die Zeiten kleiner Pendelschwingungen von der Größe des Schwingungsbogens unabhängig sind; die Schwingungen eines elastischen Körpers sind isochronisch. Man kann dies leicht mit einem senkrecht aufgehängten und mit einem Gewichte beschwerten Spiraldrahte zeigen; ein solcher macht in derselben Zeit gleich viele große oder kleine Schwingungen. Hierin unterscheiden sich die Schwingungen elastischer Körper sehr von der durch den hydrostatischen Druck und die Schwere erzeugten Wellenbewegung der Flüssigkeiten. Während bei dieser die Schwingungszeiten als Fallzeiten von der Wellenhöhe oder Amplitude abhängig sind, aber fast unabhängig von der Natur der Flüssigkeit, erfolgen die Schwingungen elastischer Körper unabhängig von der Amplitude, aber abhängig von der Natur des Körpers; denn die in der Formel für T auftretende Größe k für die Elasticität ist in verschiedenen Körpern verschieden. — Ein ähnlicher Unterschied zeigt sich auch in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c. Um für diese aus Fl. (25) $l = c \, . \, T$ einen Werth ableiten zu können, der ihre Abhängigkeit von der Natur des Körpers ausspricht, müssen wir zuerst für T einen Werth gewinnen, in welchem an Stelle der unbekannten und unmeßbaren Größe k eine andere bekannte und meßbare Größe für die Elasticität steht; wir müssen also k mit dem Elasticitätsmodul e in Zusammenhang bringen. Dieser Modul e ist in unserem Falle die Kraft, welche die Molekülreihe einer Welle, deren Querschnitt = 1 ist, doppelt so lang zu machen im Stande ist, wenn diese Kraft in der Richtung dieser Reihe, also nur in einer Richtung wirkt. In unserem Falle wirkt aber die Elasticität nicht blos in der Richtung der einen eben in Betracht gezogenen Molekülreihe, sondern in allen Richtungen einer Ebene, z. B. der Ebene des Papiers; folglich wirkt nicht blos e, sondern $2\pi \, . \, e$; denn durch die Multiplication mit 2π geschieht der Uebergang von einer Richtung in einer Ebene zu allen Richtungen in derselben. Aus demselben Grunde muß noch einmal mit 2π multiplicirt werden, weil die Elasticitätskräfte auf die Molekülreihe nicht blos in der einen Ebene, sondern in allen durch die Reihe denkbaren Ebenen wirken. Es ist demnach $2\pi \, . \, 2\pi \, . \, e = 4\pi^2 e$ die Kraft der Elasticität, welche die Moleküle um l verlängert; soll die Verlängerung nur = 1 sein, so ist die Kraft auch $l$mal kleiner (nach 65.), folglich ist $4\pi^2 e/l$ die Kraft, welche auf die Molekülreihe l wirkt. Hat die Volumeneinheit derselben die Masse d, so hat diese ganze Reihe, weil e sich auf den Querschnitt 1 bezieht, die Masse ld; demnach ist die auf die Masse = 1 wirkende

Kraft $= (4\pi^2 e/l) / ld$; diese in der Entfernung 1 auf die Masse 1 wirkende Kraft ist aber unser k; folglich ist $k = 4\pi^2 e / l^2 d$.

Setzen wir diesen Werth für k in die Formel (26) für T ein, so ergibt sich

$$T = 2\pi / \sqrt{(4\pi^2 e / l^2 d)} \text{ oder } T = l \sqrt{(d/e)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (28)$$

und wenn wir endlich diesen Werth in den aus Formel (25) sich ergebenden Werth für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $c = l/T$ einführen, so finden wir $c = l / l \sqrt{(d/e)}$ oder

$$c = \sqrt{(e/d)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (29)$$

Diese Formel für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zeigt uns, daß diese Größe sowohl von der Amplitude, wie auch von der Schwingungsgeschwindigkeit oder Schwingungszahl unabhängig ist. Große und kleine Schwingungen, schnelle und langsame Schwingungen pflanzen sich in demselben Körper mit gleicher Geschwindigkeit fort; in verschiedenen Körpern geschieht die Fortpflanzung direct proportional zu der Quadratwurzel aus dem Elasticitätsmodul und umgekehrt proportional zu der Quadratwurzel aus der Dichte, aber ebenfalls unabhängig von der Weite und der Dauer der Schwingungen. Die Wellenbewegung der Flüssigkeiten dagegen pflanzt sich um so schneller fort, je höher die Wellen sind, und je rascher die Theilchen oscilliren.

Die angeführten Formeln und daraus geschlossenen Gesetze gelten nur unter der Voraussetzung, unter welcher sie erhalten wurden, nämlich daß die zurückführende Kraft dem Abstande direct proportional sei; gilt diese Voraussetzung nicht, so treten Abweichungen von den Gesetzen ein.

Die Formeln (27) gelten für die Elongation und Phasengeschwindigkeit eines durch eine äußere Kraft bewegten Punktes, also z. B. für das erste Molekül einer Welle. Sie sind aber leicht für jedes beliebige Molekül der Welle zu erweitern, welches um x von dem ersten absteht, und in welchem die Bewegung nach der Zeit t' anlangt, für die nach Fl. (1) die Relation $c = x/t'$ oder $t' = x/c$ gilt; für dieses Molekül ist die Phasenzeit $= t - t'$, daher der Werth für die Elongation $s = r \sin [2\pi (t - t')/T] = r \sin [2\pi (t/T - x/cT)]$ oder da $cT = l$ ist,

$$s = r \sin [2\pi (t/T - x/l)] \text{ und ebenso } v = u \cos [2\pi (t/T - x/l)] \quad \ldots\ldots (30)$$

Das Zusammentreffen oder die Interferenz mehrerer fortschreitenden Wellenbewegungen (Fresnel 1830). 226 1. Die Interferenz mehrerer Wellen von gleicher Fortpflanzungsrichtung, von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Pflanzen sich in derselben Molekülreihe zwei Wellen mit verschiedenen Anfangspunkten fort, so erhält jedes Molekül durch jede der beiden Wellen eine bestimmte Schwingungszeit oder Amplitude; gehen diese Bewegungen nach einer Richtung, so ist die Amplitude des Moleküls gleich der Summe der beiden Amplituden; gehen dieselben nach entgegengesetzter Richtung, so ist der Weg des Moleküls gleich der Differenz der Amplituden, kann also auch gleich Null sein, wenn nämlich die Amplituden einander gleich sind. Das erste wird der Fall sein, wenn die beiden Wellen ganz auf einander fallen, wenn sie also von einem Punkte ausgehen, oder auch von zwei Punkten, die um ganze Wellenlängen von einander entfernt sind, wenn also, wie man sagt, die Phasendifferenz gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen ist; das letzte dagegen muß eintreten, wenn der Berg der einen Welle direct das Thal der anderen bedeckt, wenn also die beiden Wellen von Punkten ausgehen, die um $^1/_2$ Wellenlänge von einander abstehen, oder auch um $^3/_2$, $^5/_2$, $^7/_2$ u. s. w. Wellenlängen, kurz wenn die Phasendifferenz gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen ist. Wenn die Ausgangspunkte zweier gleich langen Wellen von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Fortpflanzungsrichtung um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, so verstärken die Wellen einander; sind aber die Ausgangspunkte um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt, so schwächen die Wellen einander und heben bei gleichen Amplituden einander auf.

Schärfer erhellt dies aus der mathematischen Betrachtung: Die Elongation eines Theilchens durch eine Welle ist nach Fl. (30) $s = r \sin [2\pi (t/T - x/l)]$; ist nun der Anfangspunkt der zweiten Welle um a von dem der ersten entfernt, so hat dasselbe Theilchen von diesem zweiten Anfangspunkte die Entfernung $x - a$; folglich ist seine Elongation

$s_1 = r_1 \sin [2\pi (t/T - (x - a)/l)]$. Da dasselbe Theilchen diese beiden Elongationen erhält, so ist sein Gesammtweg $S = r \sin [2\pi (t/T - x/l)] + r_1 \sin [2\pi (t/T - (x - a)/l)]$. Um aus dieser Gleichung die Schwingungsweite ersehen zu können, müssen wir dieselbe auf die Gestalt der Formeln (30) bringen, in welchen r die Amplitude bedeutet. Dies geschieht dadurch, daß wir den letzten Sinus nach der Formel für den Sinus einer Summe entwickeln; hiernach ist nämlich $\sin [2\pi (t/T - x/l + a/l) = \sin [2\pi (t/T - x/l)] \cos [2\pi (a/l)] + \cos [2\pi (t/T - x/l)] \sin 2\pi [(a/l)]$. Setzen wir diesen Werth in S ein und scheiden gemeinschaftliche Factoren aus, so ergibt sich

$S = \sin [2\pi (t/T - x/l)] \{r + r_1 \cos [2\pi (a/l)]\} + \cos [2\pi (t/T - x/l)]\, r_1 \sin [2\pi (a/l]$.

Bestimmen wir nun zwei Größen R und D so, daß

$$R \cos [2\pi (D/l)] = r + r_1 \cos [2\pi (a/l] \text{ und } R \sin [2\pi (D/l)] = r_1 \sin [2\pi (a/l)]$$

und setzen wir diese beiden Werthe in den Werth für S, so ergibt sich

$S = R \sin [2\pi (t/T - x/l)] \cos [2\pi (D/l) + R \cos [2\pi (t/T - x/l)] \sin [2\pi (D/l)]$ oder $S = R \sin [2\pi (t/T - (x - D)/l)]$. Jetzt ist die neue Elongation auf der allgemeinen Elongationsform; folglich ist R die neue Amplitude. Wie groß dieselbe ist, ergibt sich aus den zwei Bestimmungsgleichungen für R und D, wenn wir diese quadriren und dann addiren:

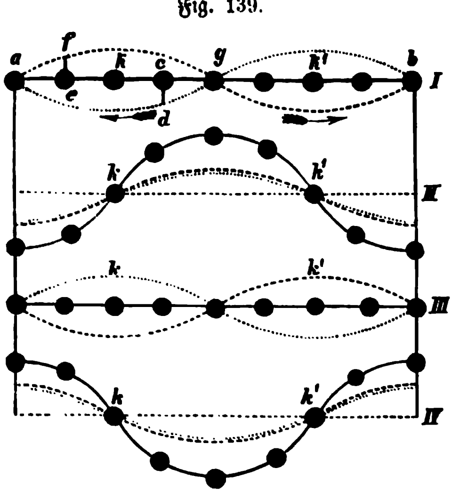
$$R^2 \cos^2 [2\pi (D/l)] = r^2 + 2rr_1 \cos [2\pi (a/l)] + r_1^2 \cos^2 [2\pi (a/l)]; \text{ hierzu}$$
$$R^2 \sin^2 [2\pi (D/l)] = \qquad r_1^2 \sin^2 [2\pi (a/l)], \text{ ergibt}$$

$R^2 = r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos [2\pi (a/l)]$, woraus $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos [a/l)]}$, ein Ausdruck, der uns durch die Uebereinstimmung mit der Fl. (14) für das Parallelogramm der Kräfte zeigt, daß die Zusammensetzung der Schwingungen ganz nach den Regeln der Mechanik geschieht. Ist nun die Phasendifferenz $a = nl$, d. i. gleich einer ganzen Anzahl von Wellenlängen, so ist $\cos 2\pi (a/l) = \cos 2n\pi = 1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1)} = r + r_1$. Ist dagegen a gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen, also $a = (2n + 1) \cdot \frac{1}{2} l$, so ist $\cos 2\pi (a/l) = \cos [(2n + 1) \pi] = -1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 - 2rr_1)} = r - r_1$; wenn $r = r_1$, so ist $R = o$; hiermit sind obige Sätze bewiesen.

Diese sehr wichtigen Erscheinungen lassen sich mit Fessels Wellenmaschine und Webers Wellenapparat (248.) zeigen; auch kann man sie in Wasser oder in Quecksilber hervorrufen, wenn man zwei Wellensysteme erregt; wo Berg und Berg zusammentreffen, zeigt sich ein höherer Berg; wo Thal und Thal auf einander kommen, ein tieferes Thal, wo aber Berg und Thal zusammentreffen, erscheint die Bewegung stark vermindert oder ganz aufgehoben. Sonst schreitet ein Wellensystem unverändert durch das andere fort.

227 2. Die Interferenz mehrerer Wellen von entgegengesetzter Fortpflanzungsrichtung aber gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Zwei Wellen afgb und bgda (Fig. 139), deren Anfangspunkte a und b um eine Wellenlänge von einander abstehen, und die gleiche Längen und Amplituden haben, liegen nach einer Schwingungszeit so auf einander, daß Berg und Thal sich gegenseitig aufheben und decken, alle Theilchen sind gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, gehen also auch gleichzeitig aus derselben heraus (I). Nach weiterem Verlauf von 1/4 Schwingungszeit, werden die Berge beider, in (II) dargestellten Wellen in der Mitte zwischen den zwei Anfangspunkten stehen und einen doppelt so hohen Berg bilden, während zu beiden Seiten dieses Berges halbe Thäler auf einander treffen und dadurch halbe Thäler von doppelter Tiefe bilden. Die Punkte k und k' zwischen den Thälern und dem Berge sind in der ursprünglichen Lage in Ruhe; sie mußten auch bisher in Ruhe sein, denn so viel sie durch das Thal der einen Welle erniedrigt wurden, ebenso

Fig. 139.



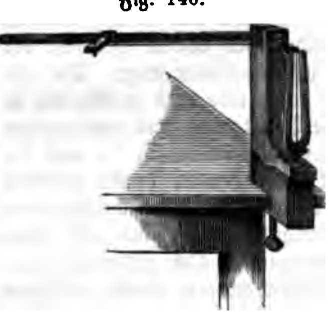
viel mußten sie durch den ebenso hohen Berg der andern Welle erhöht werden. Als z. B. von der einen Welle die Bergstelle ef sich über k befand, war von der andern Welle die Thalstelle cd unter k, deren Wirkungen sich als gleich und entgegengesetzt aufhoben. Dies geht in gleicher Weise in dem folgenden Viertel der Schwingungszeit fort, und an dem Schlusse dieses Viertels, wo wieder Berge und Thäler über einander stehen, sind nicht blos diese zwei Punkte k und k', sondern alle in der ursprünglichen Lage (III). Nach dem dritten Viertel der zweiten Schwingungszeit sind die zwei Thäler in die Mitte gelangt und bilden (IV) ein tieferes Thal, während beiderseits halbe höhere Berge stehen, und wieder dieselben Punkte k und k', die um $1/4$ der Wellenlänge von den Anfangspunkten abstehen, in der ursprünglichen Lage geblieben sind; nach vollem Verlaufe der zweiten Schwingungszeit ist wieder Alles in der ursprünglichen Lage. Da alle Theilchen immer gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, also auch gleichzeitig in den äußersten Lagen sind, so besteht die beschriebene Erscheinung aus einer ganzen und zwei halben stehenden Wellen, welche durch ruhende Punkte in $1/4$ und $3/4$ der Wellenlänge von einander getrennt sind. Diese ruhenden Punkte zwischen stehenden Wellen werden **Schwingungsknoten**, die am weitesten ausschreitenden **Schwingungsbäuche** genannt. Die Schwingungsknoten sind nicht etwa als Punkte anzusehen, die von den zwei Wellenbewegungen ganz unberührt bleiben; sie sind vielmehr die Durchgangspunkte zweier Bewegungen, welche an diesen Punkten gleich und entgegengesetzt sind; die Knoten erhalten jeden Augenblick zwei Bewegungen und pflanzen sie nach beiden Seiten hin fort, bleiben aber selbst in Ruhe oder wenigstens in stets wechselnder unendlich kleiner Bewegung nach beiden Seiten, weil jede Geschwindigkeit nach der einen Seite hin sofort durch eine nach der entgegengesetzten Seite hin aufgehoben wird. Ein Schwingungsknoten ist von einem Schwingungsbauche um eine halbe stehende Wellenlänge oder um ein Viertel der Länge der fortschreitenden Wellen entfernt, durch deren Interferenz sich die stehenden Wellen bilden. — **Durch Interferenz entgegengesetzt fortschreitender Wellen entstehen stehende Wellen von der halben Länge der fortschreitenden Wellen; je zwei nebeneinander liegende stehende Wellen sind in entgegengesetzten Phasen und durch Schwingungsknoten getrennt.** Allgemeiner folgt dies aus der mathematischen Betrachtung.

Die Elongation eines Theilchens der ersten Welle ist nach Formel (30) $s = r \sin [2\pi (t/T - x/l)]$. Ist nun der Abstand der beiden Anfangspunkte $= a$, so ist der Abstand des Theilchens von dem 2. Anfangspunkte $= a - x$; also ist die Elongation des Theilchens durch die 2. Welle $= r \sin [2\pi (t/T - (a - x)/l)]$; die Gesammtelongation ist daher $S = r \sin [2\pi (t/T - x/l)] + r \sin [2\pi (t/T - (a - x)/l)]$. Benutzen wir nun die bekannte trigonometrische Formel für die Summe zweier Sinusse $\sin a + \sin b = 2 \sin {}^1/_2 (a + b) \cos {}^1/_2 (a - b)$, so ergibt sich $S = 2r \sin [2\pi (t/T - a/2l)] \cos [\pi (a - 2x)/l)]$ oder $S = 2r \cos [\pi (2x - a)/l)] \sin [2\pi (t/T - a/2l)]$. Dieser Ausdruck ist nun auf der allgemeinen Elongationsform. Der erste Theil desselben $2r \cos [\pi (2x - a)/l)]$ gibt die Amplitude an. Dieselbe ist gleich Null, wenn $\cos [\pi (2x - a)/l)]$ gleich Null ist, d. h. wenn (für $a = l$) $x = {}^1/_4 l, {}^3/_4 l, {}^5/_4 l$ u. s. w. ist; an diesen Stellen sind also die Punkte in Ruhe, hier sind Schwingungsknoten. Ist $x < {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus positiv, als auch die Amplitude positiv; ist $x > {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus negativ, also auch die Amplitude negativ; zu beiden Seiten eines Knotens finden sich entgegengesetzte Phasen; der zweite Theil unseres Ausdruckes für die Gesammtelongation gibt die Abstände der Theilchen von der Gleichgewichtslage an; da in demselben x gar nicht vorkommt, so sind die Abstände von x unabhängig; die Theilchen durchlaufen alle gleichzeitig die Gleichgewichtslage, erreichen also auch gleichzeitig ihre äußersten Lagen, kurz es bilden sich stehende Wellen.

Auch diese Erscheinungen sind mit Fessels Wellenmaschine zu zeigen; mit einiger Uebung lassen sie sich auch an einem Seile oder an einem mit Sand gefüllten Kautschukschlauche hervorrufen, der an einem Ende befestigt und an dem anderen Ende lose mit der Hand hin- und herbewegt wird. Es werden alsdann die an dem Schlauche hinlaufenden Wellen

an dem festen Ende zurückgeworfen und bilden durch Interferenz mit neu erregten Wellen Schwingungsknoten und stehende Wellen. Auch durch Interferenz fortschreitender Wasserwellen mit reflectirten Wellen lassen sich stehende Wellen erzeugen. Indessen sind hier wie bei allen durch Reflexion erzeugten stehenden Wellen, die letzten Knoten nicht halb soweit von den Enden entfernt als von den nächsten Knoten, sondern ihre Abstände von den Endpunkten sind ebenso groß, wie ihre Abstände von einander; es rührt dies davon her, daß, wie sich bei der Reflexion (231.) ergeben wird, die reflectirte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, wodurch sich die Knoten um $^1/_4$ dieser Länge verschieben. Am schärfsten und mannichfaltigsten sind diese Erscheinungen an Meldes (1860) Stimmgabelapparat (Fig. 140) hervorzurufen. Mit einer Stimmgabel ist ein Faden verbunden, der mit dem Stifte eines auf einem Lineale verschiebbaren Schlittens verknüpft ist und daher nach Belieben länger und kürzer gespannt werden kann. Wenn nun die Stimmgabel zum Tönen, d. i. zum Schwingen gebracht wird, so pflanzen sich die Schwingungen auf den Faden fort, werden an dem Stifte reflectirt und bilden mit neu ankommenden Schwingungen stehende Wellen; diese bilden sich aber nur dann, wenn die Fadenlänge ein Ein- oder Vielfaches von der halben Länge der Welle ist, welche die Gabel in dem Faden hervorruft; man kann diese Bedingung durch Spannen und Verlängern des Fadens erfüllen. Ist der Faden an beiden Enden mit Stimmgabeln verbunden, so erhält man die stehenden Wellen ohne das Hilfsmittel der Reflexion. — Befestigt man nach Matthiessen (1868) an die beiden Zinken einer Stimmgabel dünne Stifte und läßt deren Spitzen in Flüssigkeit tauchen, während die Stimmgabel tönt, so entstehen kleine Kräuselwellen, die zwischen den Spitzen zu stehenden Wellen interferiren; die Ursache dieser Wellen ist die Elasticität der Flüssigkeitshaut; daher folgen sie den zuletzt gefundenen Gesetzen, nicht aber den Gesetzen der durch die Schwere erzeugten großen Wasserwellen.

Fig. 140.



228 3. Interferenz von Wellen verschiedener Schwingungsrichtung. Wie in einer Reihe von Molekülen sich nach einer oder nach entgegengesetzter Richtung solche Schwingungen fortpflanzen können, die nach einer Richtung vor sich gehen, so können die Schwingungsrichtungen auch einen Winkel mit einander machen. Hierdurch erfährt jedes Molekül eine Wirkung durch zwei nach verschiedenen Richtungen gehende Kräfte; welchen Weg es dabei einschlägt, ist nach dem Satze von dem Parallelogramm der Kräfte zu berechnen. Vollzieht man eine solche Rechnung, so ergibt sich aus den Lehren der analytischen Geometrie, daß allgemein gefaßt der Weg des Moleküls die Form einer Ellipse haben muß, welche in eine gerade Linie übergeht, wenn die Phasendifferenz = 0 ist, und in einen Kreis, wenn die Schwingungsrichtungen auf einander senkrecht stehen, und die Amplituden einander gleich sind.

Die Vereinigung zweier Schwingungsbewegungen läßt sich beobachten an Meldes (1862) Universalkaleidophon (*καλός* = schön, *εἶδος* = Gestalt, *φωνή* = Ton). Dasselbe besteht aus einer festgeklemmten Lamelle, die eine zweite Klemme zur Aufnahme einer zweiten Lamelle mit einem glänzenden Knopfe trägt. Setzt man die beiden Lamellen gleichzeitig in Schwingungen, so entstehen allerlei leuchtende Schwingungscurven.

Wie sich zwei Schwingungsbewegungen zu einer neuen componiren, so kann und muß auch die Vereinigung von mehr als zwei solcher Bewegungen stattfinden, wenn diese sich in derselben Molekülreihe fortpflanzen; die Vereinigung geschieht hierbei immer nach dem Parallelogramm der Kräfte. Hierdurch kann die Bahnform der schwingenden Theilchen sich noch weiter von der geraden Linie entfernen als in der elliptischen oder kreisförmigen Bahn; alle nur denkbaren geschlossenen Curven mit unzähligen Einbiegungen, Zacken und anderen kleineren Veränderungen können vorkommen. Kann ein Medium Wellen von den verschiedensten Längen annehmen, so können auch die verschiedensten Wellen interferirend auf einander wirken, jedoch nur so weit, als sie sich auf dieselben Theile des Mediums erstrecken; treten sie aus dem gemeinschaftlichen Theile heraus, so pflanzen sie sich, ungeändert durch die vorhergegangene Interferenz, in derselben Weise weiter fort, als ob keine Interferenz stattgefunden hätte. Man nennt diese ungestörte Fortpflanzung verschiedener Wellen durch ein und dasselbe Medium die Superposition kleinster Schwingungen; sie gilt wirklich nur für kleinste Schwingungen; bei endlicher Amplitude dagegen entstehen secundäre Wellenbewegungen. Noch beschränkter ist die Erscheinung in einem Medium, das für eine bestimmte

Schwingungsbewegung abgestimmt ist; ein solches vermag nur Wellen von der Länge dieser Bewegung auszuführen und außerdem noch Wellen von 2, 3, 4 ... fach kürzerer Länge, weil alle anderen Wellen unregelmäßig reflectirt und so zersplittert werden. Jene Hauptwelle nun kann und muß mit diesen Wellen zu einer neuen verwickelten, aber doch regelmäßigen Schwingungsbewegung interferiren, weil in diesem Falle auf eine längere Welle mehrere kürzere immer an denselben Punkten treffen, und weil nur dann die sämmlichen Combinationswellen einander gleich sind. Sowie aber nach dem Parallelogramm der Kräfte eine zusammengesetzte Bewegung in ihre Componenten zerlegt werden kann, so kann auch *jede noch so verwickelte Schwingungsbewegung* der *Moleküle* wieder in die componirenden Theilbewegungen, *in einfache, geradlinige, pendelartige Schwingungen zerlegt werden; und zwar kann* ebenso, wie aus mehreren einfachen Wellen eine ganz bestimmte Interferenzwelle hervorgeht, *eine bestimmte zusammengesetzte Schwingungsbewegung nur auf eine Art in einfache pendelartige Schwingungen zerlegt werden, deren Schwingungszeiten ganze Vielfache von einander sind* (Fouriers Gesetz 1827). Eine solche Zerlegung muß stattfinden, sowie die Schwingungsbewegung auf Gegenstände trifft, die nur pendelartige Schwingungen vollziehen können, ganz in derselben Weise, wie eine schief gerichtete Kraft sich von selbst in Componenten zerlegt, wenn sie auf eine Fläche wirkt, die sich nur senkrecht zu ihrer eigenen Richtung bewegen kann.

229 **Ausbreitung der Wellen.** Wie sich eine Wellenbewegung ausbreitet, hängt von der Beschaffenheit des Stoffes ab, in welchem die Bewegung vor sich geht; man nennt denselben das Fortpflanzungsmittel oder das *Medium*; die Richtung, in welcher sich die Bewegung fortpflanzt, nennt man Strahl oder *Radius*. Sind auf einem Radius die Dichte und die Elasticität des Mediums unveränderlich, so nennt man das Medium *homogen*, im entgegengesetzten Falle *heterogen*; stehen die Dichte und die Elasticität in den Richtungen aller nur denkbaren Radien in demselben Verhältnisse zu einander, so wird das Medium ein *isotropes* genannt, andernfalls ein *anisotropes*.

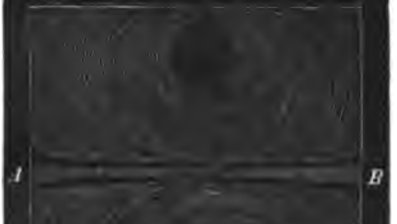
Von einem Punkte eines isotropen Mediums aus pflanzt sich eine Wellenbewegung nach allen Richtungen fort; denn dieser Punkt ist der Anfangspunkt einer unendlichen Anzahl von Molekülreihen, in welchen allen durch die Bewegung des ersten Punktes eine gleiche Störung des Gleichgewichtes erzeugt wird. — In allen diesen Richtungen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieselbe, weil der dieselbe bestimmende Ausdruck $\sqrt{(e / d)}$ unverändert bleibt. — Die Wellenbewegung pflanzt sich in immer größer werdenden Kugelwellen fort; denn z. B. nach einer Schwingungszeit ist auf allen Molekülreihen die Bewegung um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge fortgerückt; es fangen daher alle Theilchen auf der Oberfläche einer Kugel, deren Radius gleich der Wellenlänge ist, gleichzeitig ihre Bewegung an, vollenden sie in gleichen Zeiten und sind daher immer in gleichen Phasen. Dauert die Erregung fort, so beginnen diese Theilchen nach zwei Schwingungszeiten neue Schwingungen; dasselbe thun dann aber auch alle Theilchen einer zweiten Kugeloberfläche, die von der ersten um eine Wellenlänge concentrisch absteht, weil sich die erste Bewegung während der zweiten Schwingungszeit um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge, von der ersten Kugelfläche aus auf allen Molekülreihen fortgepflanzt hat; es sind daher die Theilchen dieser zwei Kugelflächen in gleichen Phasen. — Eine Fortsetzung dieser einfachen Betrachtung ergibt, daß alle Theilchen solcher um den Anfangspunkt concentrischen Kugelflächen, die um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen, in gleichen Phasen begriffen sind, daß aber die Moleküle derjenigen Kugelflächen sich in entgegengesetzten Phasen befinden, die um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind. — Die Richtungen der Fortpflanzung stehen auf der Wellenoberfläche senkrecht, weil diese Richtungen die Radien von Kugeln sind, und weil die Radien auf den Elementen von Kugelflächen senkrecht stehen. Zieht man nur Flächenelemente in Betracht, so darf man die Wellenoberfläche als eben, einen Schnitt derselben als gerade Linie ansehen; dasselbe darf auch geschehen, wenn der An-

fangspunkt sehr weit entfernt ist, z. B. soweit wie die Sonne und die Sterne. — Die Richtungen der Fortpflanzung sind gerade, vom Anfangspunkte ausgehende Linien; denn jede radiale Richtung an einer beliebig großen Kugelwelle ist immer die Verlängerung einer radialen Richtung einer um sehr wenig kleineren Kugelwelle; verfolgt man auf diese Weise die radialen Richtungen auf immer kleinere Kugelwellen, so gelangt man endlich in gerader Richtung zu dem Anfangspunkte.

Die Stärke oder Intensität der Schwingungsbewegung steht in umgekehrtem Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung von dem Anfangspunkte. Denn die Kugelwellen, auf welche sich die anfängliche Bewegung fortpflanzt, werden immer größer und verhalten sich nach einem bekannten geometrischen Satze wie die Quadrate ihrer Radien; da sich nun dieselbe lebendige Kraft, mit welcher der Anfangspunkt sich bewegt, von einer dieser Kugelwellen auf die andere verbreitet, so kann ein und dasselbe Flächenstück von zweien solcher Kugelflächen nicht einen gleichen Betrag von lebendiger Kraft empfangen, sondern dieser Betrag muß in demselben Maße kleiner werden, als die Kugelflächen wachsen. Die lebendige Kraft der Bewegung bestimmt aber die Intensität derselben; folglich steht die Intensität der Bewegung im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Radien der Kugelwellen.

Wenn sich auch die Kugelwellen selbst nicht sichtbar machen lassen, so läßt sich doch nach Abria (1841) eine Folge derselben sichtbar darstellen, die durch ihre Form die Kugelform der Luftschallwellen nachweist und in neuester Zeit von Mach (1873), sowie von Schellbach und Böhm (1879) nützlich angewendet wurde. Mit Wasser angeriebener und dann geglühter Kohlenstaub wird auf glasirtem Visitenkartenpapier ausgebreitet, und über einer solchen Tafel läßt man in einiger Entfernung elektrische Funken zwischen zwei Kugeln überschlagen oder Knallgasblasen explodiren oder einen andern Explosivstoff verpuffen. Die Kugelwellen treffen dann den Staub, schieben ihn vor sich her, und häufen ihn in ihrer eigenen Form an; es entstehen auf diese Weise Kreisringe, deren Form die Kugelgestalt der Wellen beweist. Fig. 141 stellt zwei Kreisringsysteme dar, wie sie von zwei Funkenstellen hervorgerufen werden. Beiläufig gesagt, beweist diese Fig. auch noch, daß der Knall nur aus einer Welle besteht; eine Aufeinanderfolge von Wellen müßte die am Schlusse von 226. beschriebene gegenseitige Durchkreuzung der Wellen bewirken; die geradlinige Anhäufung AB ist eine Folge der Aufhebung zweier Wellen von entgegengesetzter Richtung.

Fig. 141.



230 **Das Huyghens'sche Princip** (1690). Statt sich vorzustellen, die Schwingungsbewegung eines Moleküls habe sich in einer am Anfangspunkte beginnenden Molekülreihe von Theilchen zu Theilchen bis zu dem Molekül fortgepflanzt, wie wir es bisher durchführten, kann man sich nach Huyghens die Ausbreitung der Wellenbewegung auch so denken, daß jedes bewegte Theilchen den Mittelpunkt einer Kugelwelle bilde, und daß demnach die Bewegung eines Moleküls das Resultat der Zusammenwirkung unendlich vieler Kugelwellen sei; man nennt dieselben Elementarkugelwellen (Ekw.).

Diese Vorstellung führt zu denselben, so eben betrachteten, Folgerungen wie die erste Vorstellung; sie ist berechtigt, weil ja jedes schwingende Theilchen eine Kugelwelle bildet. Durch diese Vorstellung ergibt sich zunächst, daß von einer Kugelfläche aus sich in einer Schwingungszeit eine neue concentrische Kugelwellenfläche von gleicher Phase bildet; denn sind alle Theilchen der ersten Kugelfläche die Mittelpunkte von neuen Ekwn., so entstehen rings um die erste Kugelfläche unendlich viele eng neben und in einander liegende Halbkugelwellen von gleichen Radien, weil die Dichte und Elasticität des Mediums überall die-

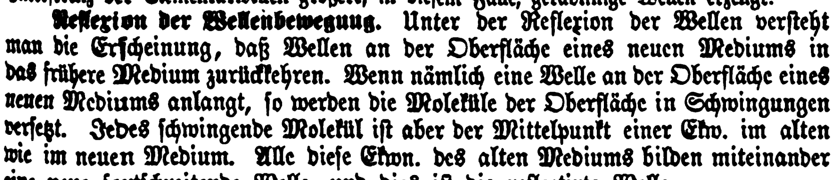
selben sind. Die Oberflächentheilchen dieser Wellen sind nach einer Schwingungszeit alle in gleichen Phasen mit einander und mit der ersten Kugelfläche; folglich sind auch die äußersten unendlich enge neben einander liegenden Theilchen aller dieser Ekwn. gleich weit von der ersten Kugelfläche entfernt und in gleicher Phase, bilden also um diese eine zweite concentrische Kugelwelle von gleicher Phase, welche die einhüllende Fläche aller Elementarkugelwellen ist. Ein Blick auf Fig. 142 macht dies vollständig klar. — Wollte man nun gegen diese Vorstellung einwenden, daß durch dieselbe jedes Molekül von unzähligen Anfangspunkten bewegt erscheine und daß demnach die Bewegung des Moleküls unendlich groß sein müsse, so ist dagegen Folgendes zu bemerken: In dem Momente, wo sich die Bewegung des Anfangspunktes in einer Molekülreihe um eine Wellenlänge fortgepflanzt hat, beginnt das letzte Molekül seine Bewegung; jetzt aber gibt es zu jedem Molekül der Reihe immer ein anderes, das sich in entgegengesetzter Phase befindet, weil es von dem ersteren um eine halbe Wellenlänge absteht; die Einwirkungen von je zwei solcher Moleküle auf das letzte heben einander auf. Ganz dasselbe gilt auch von allen anderen ringsum liegenden Theilchen, die ihre Bewegung von dem ersten empfangen haben. Also ist die Wirkung auf das letzte Molekül gerade so, als ob nur das erste sich bewegt hätte. — Diese Vorstellung von Huyghens wird uns manche der folgenden Betrachtungen erleichtern, weßhalb sie besonders zu beachten ist. Experimentell anschaulich machen läßt sie sich durch eine Vorrichtung von Mach (1868): Auf den Mantel abcd (Fig. 143) eines Cylinders sind Kreise um m und n gezeichnet, welche Elementarkugelwellen vorstellen sollen. Wird nun der Cylinder in Rotation gesetzt, so sieht man zu ab parallele helle und dunkle Streifen, welche uns zeigen, daß die Interferenz der Elementarwellen größere, in diesem Falle, geradlinige Wellen erzeugt.

Fig. 142.





Fig. 143.



231 **Reflexion der Wellenbewegung.** Unter der Reflexion der Wellen versteht man die Erscheinung, daß Wellen an der Oberfläche eines neuen Mediums in das frühere Medium zurückkehren. Wenn nämlich eine Welle an der Oberfläche eines neuen Mediums anlangt, so werden die Moleküle der Oberfläche in Schwingungen versetzt. Jedes schwingende Molekül ist aber der Mittelpunkt einer Ekw. im alten wie im neuen Medium. Alle diese Ekwn. des alten Mediums bilden miteinander eine neue fortschreitende Welle, und dies ist die reflectirte Welle.

Nach dem Huyghens'schen Princip wirkt nämlich jedes schwingende Mol. nicht blos vorwärts, in der Richtung der Fortpflanzung der Wellenbewegung, sondern auch rückwärts, da jedes Mol. der Mittelpunkt einer Ekw. ist; indessen wird in einem isotropen Medium hierdurch keine rückwärts schreitende Wellenbewegung erzeugt; denn zu jedem Mol. läßt sich immer ein solches finden, das um eine halbe Wellenlänge von demselben entfernt und daher in entgegengesetzter Phase ist; hierdurch heben sich die Rückwirkungen dieser zwei Mol. auf, weil die von denselben erzeugten Bewegungen vollkommen gleich und entgegengesetzt sind. Ganz anders aber gestaltet sich die Rückwirkung, wenn das Medium eine Veränderung erfährt, dichter oder weniger dicht wird; dann wird jedenfalls die Bewegung der Theilchen der ersten Schicht des neuen Mediums eine andere sein, als diejenige der rückwärts liegenden Theilchen des alten Mediums; es können daher auch die rückschreitenden Theile der Ekwn. des neuen Mediums nicht mehr in ihrer Wirkung aufgehoben werden, ein größerer oder kleinerer Theil der an dem neuen Medium anlangenden Schwingungsbewegung muß in das alte Medium zurückkehren, während der übrige Theil sich in veränderter Weise in das neue Medium fortpflanzt. Wenn also eine Wellenbewegung auf ein anderes Medium trifft, so wird sie von demselben theilweise zurückgeworfen oder reflectirt, theilweise, aber in veränderter Art, aufgenommen; jeder von diesen beiden Theilen kann je nach der veränderten Beschaffenheit des Mediums, das eine mal sehr groß, das andere mal verschwindend klein sein, so daß auch eine nahezu vollständige Reflexion denkbar ist, ebenso wie eine nahezu vollständige Aufnahme, welcher letztere Fall bei sehr geringer Verschiedenheit der beiden Medien eintreten wird.

Ist das neue Medium dichter als das alte, so ist die zurückgeworfene Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellen-

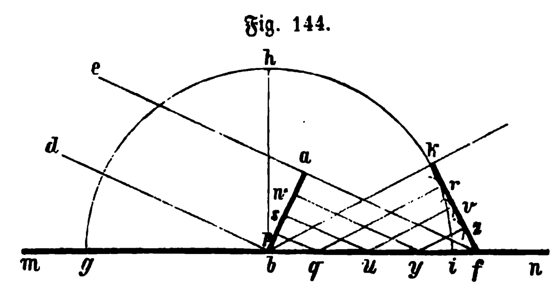
länge verschoben. Denn ein gegen die Wand stoßendes Theilchen wird zurückgeworfen, ein z. B. aufwärts gehendes Theilchen wird sofort durch die stärkere Anziehung des dichteren Mediums abwärts gezogen, kurz jedes Theilchen gelangt in die entgegengesetzte Phase. Langt daher die Welle als Thal an, so kehrt sie als Berg zurück, und umgekehrt; die reflectirte Welle ist gegen die einfallende um $^1/_2$ Wellenlänge verschoben. — Besonders wichtig ist die Richtung der zurückgeworfenen Welle; es ist gebräuchlich, hierbei die Richtung des bekanntlich auf der Wellenfläche senkrecht stehenden Strahles ins Auge zu fassen, und statt des Winkels, den die Welle mit der reflectirenden Wand einschließt, den gleichen Winkel zu betrachten, den der Strahl mit einem an der Berührungsstelle auf der Fläche errichteten Lothe bildet. Man nennt den Winkel, welchen der Strahl der ursprünglichen Welle mit dem Lothe einschließt, den Einfallswinkel, und den Winkel, den der Strahl der zurückgeworfenen Welle mit dem Lothe einschließt, den Reflexionswinkel. Für die Reflexion gelten folgende zwei Gesetze:

1. Der reflectirte Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der reflectirte und der einfallende Strahl liegen auf einer Seite der reflectirenden Fläche, aber auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes, und der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

Beweis. Es sei ab (Fig. 144) ein so kleiner Theil einer Welle, daß derselbe als geradlinig und die beiden Strahlen db und ea daher als parallel angesehen werden dürfen; dieser Theil der Welle lange unter dem Einfallswinkel abn = dbh auf der Oberfläche an eines neuen Mediums an. Nach dem Huyghens'schen Princip ist der Punkt b nun der Mittelpunkt einer Ekw., die sich sowohl in das neue, wie in das alte Medium fortpflanzt, in dem alten Medium jedenfalls mit der alten Geschw. c, wie die Fortpflanzung der Welle ab selbst geschah und noch weiter geschieht. Die Zeit, nach welcher die Welle ab in f anlangt, ist t = af/c; während dieser Zeit t hat sich um b eine Ekw. ghi gebildet, deren Radien bh u. bk gleich af sind. Jedoch ist die Welle während dessen an allen Punkten zwischen b und f eingetroffen, an jedem folgenden etwas später, wodurch auch von all diesen Punkten immer kleiner werdende Ekwn. ausgegangen sind, von denen drei

Fig. 144.



in der Fig. punktirt angedeutet wurden. Nach $^1/_4$ t war die Welle in q, vorausgesetzt, daß bq = $^1/_4$ bf, also pq = $^1/_4$ af ist; demnach mußte in den folgenden $^3/_4$ t die Ekw. mit dem Radius qr entstehen, der = $^3/_4$ af ist. Ebenso entstand nach $^1/_2$ t von u aus in dem folgenden $^1/_2$ t die Ekw. mit dem Radius uv = $^1/_2$ af, und nach $^3/_4$ t von y aus in dem folgenden $^1/_4$ t die Ekw. mit dem Radius yz = $^1/_4$ af, während um f selbst noch keine Ekw. entstanden ist, da hier die Bewegung nach der Zeit t erst eben ankommt. Die einhüllende Fläche dieser unendlich vielen Ekwn. ist die reflectirte Welle. Da die Radien bk, qr, uv und yz sich wie 4 : 3 : 2 : 1 verhalten, geradeso wie die Abschnitte bf, qf, uf und yf der geraden Linie bf, so ist nach den Fundamentalsätzen der Aehnlichkeit auch kf eine gerade Linie, die einhüllende Fläche der Ekwn. ist die Tangentialebene kf; also bildet diese Tangentialebene die reflectirte Welle und das Loth bk ist der Strahl derselben, der reflectirte Strahl. Der Reflexionswinkel ist demnach hbk = kfb. Aus der Congruenz der Dreiecke bfa und bfk folgt aber, daß dieser Reflexionswinkel kfb gleich dem Einfallswinkel abf ist, womit das Hauptgesetz der Reflexion seinen Beweis gefunden hat. Denkt man sich durch die Ekw. vor und hinter der Ebene des Papiers Ebenen gelegt, parallel zu dem Kreise ghi, so entstehen lauter kleinere Parallelkreise; diese werden von der Tangentialebene fk nicht berührt; nur der Kreis ghi hat diese Berührung; folglich liegt auch der zurückgeworfene Strahl in der Ebene dieses Kreises, d. i. in derselben Ebene, in welcher der einfallende Strahl und das Einfallsloth liegen; der einfallende und der reflectirte Strahl liegen mit dem Einfallslothe in einer Ebene, Reflexionsebene genannt. Auch ist leicht er-

sichtlich, daß die reflectirte Welle mit der einfallenden nicht nur in der Richtung gegen die reflectirende Fläche übereinstimmt, sondern auch in der Gestalt und Größe wegen der völligen Gleichheit aller Einzeldimensionen sogar bei krummen Wellen, und daß nur die Bewegungsrichtung und die Lage die entgegengesetzten sind. Hieraus folgt, daß eine Kugelwelle in derselben Kugelgestalt, mit demselben Radius zurückgeworfen wird, daß aber der Mittelpunkt der zurückschreitenden Welle soweit hinter der Wand liegt, als der Anfangspunkt der einfallenden Welle vor der Wand. — Wellen, die an dem einen Brennpunkte eines elliptischen, mit Quecksilber gefüllten Gefäßes etwa durch Eintröpfeln von Quecksilber erzeugt werden, vereinigen sich in dem anderen Brennpunkte, weil die Ellipse die Eigenschaft hat, daß die von den beiden Brennpunkten an ein Curvenelement gezogenen Leitstrahlen mit diesem Elemente gleiche Winkel bilden. — Werden in dem Brennpunkte eines parabolischen Gefäßes in ähnlicher Weise Wellen erregt, so ziehen dieselben nach der Reflexion geradlinig und senkrecht zur Achse hinaus, weil bei der Parabel ein Leitstrahl und eine Parallele zur Achse mit einem Curvenelemente gleiche Winkel bilden.

232 **Brechung der Wellen.** Unter der Brechung der Wellen versteht man die Veränderung, welche die Richtung einer Welle erfährt, wenn dieselbe in ein anderes Medium übergeht. Wenn eine Welle an der Oberfläche eines neuen Mediums anlangt, so werden die Moleküle dieser Oberfläche in Schwingungen versetzt. Jedes schwingende Molekül ist aber der Mittelpunkt einer Ekw. im neuen Medium, deren Radius größer oder kleiner ist als im alten Medium. Alle diese Ekwn. des neuen Mediums bilden mit einander eine neue Welle, die gebrochene Welle; dieselbe hat eine andere Richtung als die alte Welle, weil ihre Ekwn. andere Radien haben als im alten Medium.

Denn in einem anderen Medium ist die Dichte eine andere, folglich wird auch die Fortpflanzungsgeschw. sich verändern gemäß der Veränderung des Ausdrucks $\sqrt{(e/d)}$; und zwar muß die neue Geschw. c′ größer sein als die frühere c, wenn bei gleicher Elasticität die Dichte des Mediums kleiner geworden ist; hat aber das neue Medium eine größere Dichte, so wird die Geschw. kleiner werden. Folglich haben die in das neue Medium eintretenden Ekwn. in derselben Zeit größere oder kleinere Durchmesser, als die in das frühere Medium von denselben Molekülen zurückkehrenden Ekwn.; daher muß die aus der Interferenz der Ekwn. hervorgehende, in das neue Medium fortschreitende Welle eine andere Richtung haben als in dem früheren Medium.

Man nennt den Winkel, den die von ihrer Richtung abgelenkte oder gebrochene Welle mit der Oberfläche des neuen Mediums macht, oder was dasselbe ist, den der Strahl der gebrochenen Welle mit dem Einfallslothe einschließt, den Brechungswinkel. Für die Brechung gelten folgende Gesetze:

1. Der gebrochene Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

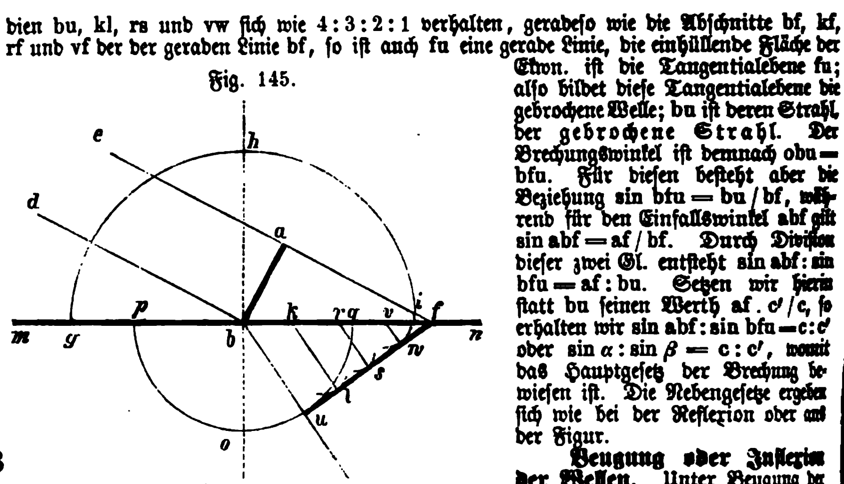
2. Der gebrochene und der einfallende Strahl liegen auf entgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche und des Einfallslothes, und das Verhältniß der Sinusse des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist constant, nämlich gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in beiden Medien, oder

$$\sin\alpha : \sin\beta = c : c' = n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (31)$$

Beweis. Die Zeit, nach welcher die Welle ab (Fig. 145) bis f in dem bisherigen Medium fortschreitet, ist $t = af/c$; während dieser Zeit bildet sich um den Punkt b eine Ekw., sowohl in dem alten Medium als in dem neuen. Der Radius der Ekw. ghi in dem alten Medium ist $bh = af$. Ist das neue Medium dichter als das alte, so muß der Radius bo der in dem neuen Medium entstehenden Ekw. poq kleiner sein; er ist gleich der Zeit af/c multiplicirt mit der Fortpflanzungsgeschw. c′ in dem neuen Medium; also ist $bs = af \,.\, c'/c$. Während jener Zeit ist die Welle ab auch an allen Punkten zwischen b und f eingetroffen, an jedem folgenden etwas später, wodurch auch von diesen Punkten aus in dem neuen Medium immer kleiner werdende Ekwn. ausgegangen sind, die in der Figur durch punktirte Bogen angedeutet wurden. Nach $^1/_4$ t war die Welle in k; also hat sich in den folgenden $^3/_4$ t die Ekw. mit dem Radius kl gebildet, der $= {}^3/_4\, af \,.\, c'/c$ ist; ebenso entstand nach $^1/_2$ t in dem folgenden $^1/_2$ t die Ekw. mit dem Radius $rs = {}^1/_2\, af \,.\, c'/c$, und nach $^3/_4$ t in dem folgenden $^1/_4$ t die Ekw. mit dem Radius $vw = {}^1/_4\, af \,.\, c'/c$. Die Einhüllende Fläche dieser unendlich vielen Ekwn. ist die gebrochene Welle. Da die Ra-

dien bu, kl, rs und vw sich wie 4 : 3 : 2 : 1 verhalten, geradeso wie die Abschnitte bf, kf, rf und vf der der geraden Linie bf, so ist auch fu eine gerade Linie, die einhüllende Fläche der Etwn. ist die Tangentialebene fu; also bildet diese Tangentialebene die gebrochene Welle; bu ist deren Strahl, der **gebrochene Strahl**. Der Brechungswinkel ist demnach obu = bfu. Für diesen besteht aber die Beziehung sin bfu = bu / bf, während für den Einfallswinkel abf gilt sin abf = af / bf. Durch Division dieser zwei Gl. entsteht sin abf : sin bfu = af : bu. Setzen wir hierin statt bu seinen Werth af . c′ / c, so erhalten wir sin abf : sin bfu = c : c′ oder sin α : sin β = c : c′, womit das Hauptgesetz der Brechung bewiesen ist. Die Nebengesetze ergeben sich wie bei der Reflexion oder aus der Figur.

Fig. 145.



233 **Beugung oder Inflexion der Wellen.** Unter Beugung der Wellen versteht man die Fortpflanzung der Wellenbewegung um eine Kante herum in den Hinterraum eines Wandrandes, z. B. hinter die zwei Ränder einer Spalte in einer dünnen Wand. Der Raum direct hinter der Spaltöffnung zeigt keine Eigenthümlichkeiten, da sich die Wellenbewegung ohne Hinderniß in denselben fortpflanzen kann; dagegen in dem Raume hinter den Rändern zeigt die Wellenbewegung eigenthümliche Veränderungen, die wieder am deutlichsten durch die Huyghens'schen Etwn. zu erklären sind. In diesen Raum pflanzt sich nämlich die Wellenbewegung nicht direct fort, es werden daher auch nicht alle Etwn. durch entgegengesetzte Wirkungen aufgehoben, sondern diejenigen Etwn., die von den schwingenden Mol. am Rande ausgehen, breiten sich kugelförmig hinter den Rand aus. Die Zahl der Etwn. ist eine beschränkte; daher ist die Wellenbewegung hinter dem Rande wesentlich geschwächt und verschwindet in einiger Entfernung von dem Rande ganz. Diese Entf. ist um so größer, je stärker die Wellenbewegung ist, je länger die Wellen sind und je langsamer dieselben sich fortbewegen, weil dann Kraft und Zeit für die seitliche Bewegung in größerem Maße vorhanden sind. Diese seitliche geschwächte Bewegung aber geht von wenigen mehr oder minder weit von einander entfernten Mittelpunkten aus; sind die Entf. derselben gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen, so müssen sich die Bewegungen gegenseitig verstärken; sind aber die Entf. gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen, so heben sich je zwei Bewegungen gegenseitig auf und es muß daher eine Schwächung der Bewegung eintreten. Hinter dem Rande werden also Stellen von verstärkter und geschwächter Wellenbewegung mit einander abwechseln.

234 **Aufg.** 355. Die Schwingungszeit der Wasserwellen soll der Quadratwurzel aus der Wellenlänge proportional sein und für Wellen von 1^{m} Länge 1½ Sec. betragen; wie groß ist sie für Wellen von 1^{dm} und von 10^{m} Länge? Aufl.: ca. ½ und 4½ Sec. — A. 356. Zu zeigen, daß auch die Fortpflanzungsgeschw. dieser Wellen der Wurzel aus der Wellenlänge proportional ist. Anl.: Man benutze Fl. (25) für T und den Satz in Aufg. 355. — A. 357. Wie groß sind Elongation und Phasengeschw. nach $^1/_{12}$ und nach $^1/_6$ der Schwingungszeit? Aufl.: Nach Fl. (27) ist $s = {}^r/_2$ und $= {}^r/_2 \sqrt{3}$; sodann $v = {}^u/_2 \sqrt{3}$ und $= {}^u/_2$. — A. 358. Wenn die langsamste Schallschw. ⅛ Sec. dauert, und der Schall in 1 Sec. 336^{m} zurücklegt, wie groß ist dann die Welle jenes Schalles? Aufl.: Nach Fl. (25) ist l = 42^{m}. — A. 359. Wie lang ist die Luftwelle des Tones a, wenn die Schwingungszahl desselben = 440 ist? Aufl.: l = 76^{cm}. — A. 360. Wie viel Schw. hat violettes Licht, dessen Wellenlänge = 0,0004^{mm}, wenn die Geschw. des Lichtes = 40 000 M. ist. Aufl.: 742 Bill. — A. 361. Welches ist die Wellenlänge dunkler Wärmestrahlen von 200 Bill. Schw. per Sec.? Aufl.: 0,001 484^{mm}. — A. 362. Zu zeigen, daß der Schall in dichter und dünner Luft gleiche Fortpflanzungsgeschw. besitzt! Aufl.: Benutze Fl. (29) und das Mariotte'sche Gesetz. — A. 363. Wie groß ist die Geschw. des Schalles in Wasserstoff? Aufl.: $336 / \sqrt{0{,}0688}$ = 1281^{m}. — A. 364. Was ist hier gegen die Ansicht einzuwenden, daß der Lichtäther verdünnter Wasserstoff sei? Anl.: Die Fl. (29), das Mariotte'sche Gesetz, die Geschw. des Schalles in H = 1281^{m} und die Geschw. des Lichtes = 40 000 M. — A. 365. Was müßte stattfinden, wenn jene Ansicht richtig wäre? Anl.: Die Dichte des H müßte unendlich viel rascher abnehmen als die Elasticität desselben; vergl. Fl. (29). —. A. 366. In welchem Verhältnisse müssen die Elasticität und Dichte des Aethers im Weltraume zu

einander stehen, damit die Geschw. des Lichtes = 40 000 M. sei? Antw.: $\sqrt{(e/d)} = 40\,000$. — A. 367. In welcher Zeit legt eine Wellenbewegung den Weg w zurück? Aufl.: Zeit $= w / \sqrt{(e/d)}$. — A. 368. Nach welcher Zeit kommt ein Theilchen, das um $^1/_4$ der Wellenlänge vom ersten entfernt ist, zur Ruhe? Aufl.: Nach Fl. (30) ist $t = {}^1/_2\,T, {}^3/_2\,T, {}^5/_2\,T \ldots$ — A. 369. Nach welcher Zeit kommt dieses Theilchen wieder in die ursprüngliche Lage? Aufl.: $t = {}^3/_4\,T, {}^5/_4\,T$ u. s. w., ebenfalls nach Fl. (30). — A. 370. Welche Entf. müssen die Erregungspunkte zweier violetten Strahlen von $0{,}0004^{mm}$ Wellenlänge haben, um sich gegenseitig aufzuheben? Aufl.: $0{,}0002^{mm}$, $0{,}0006^{mm}$, $0{,}001^{mm}$ u. s. w. — A. 371. Welche Entf. müssen die Tonquellen zweier a besitzen, um sich zu verstärken? Aufl.: 76^{cm}, 152^{cm}, 228^{cm} u. s. w. — A. 372. Welcher Unterschied (Gangunterschied) findet zwischen den Entf. der Knoten von den Erregungsstellen zweier entgegengesetzt gerichteten Wellen l statt? Aufl.: ${}^1/_2 l, {}^3/_2 l, {}^5/_2 l \ldots {}^1/_2 (2 + 1)\, l$. — A. 373. Wenn ein Erregungspunkt um d von einer Wand absteht, wo liegen die Knoten und wo die Bäuche? Aufl.: $(2d - x) - x = {}^1/_2\,(2n - 1)\,l + {}^1/_2\,l = {}^1/_2 \,.\, 2nl$; hieraus $x = d - {}^1/_2 \,.\, nl = d - {}^1/_4 \,.\, 2nl$; für die Bäuche $d - {}^1/_4\,(2n + 1)\,l$. — A. 374. Wo liegen die Knoten und Bäuche für ein a, das 300^{cm} von der Wand ertönt? Aufl.: Knoten 262^{cm}, 224^{cm}, 182^{cm}, $148^{cm} \ldots$; Bäuche 281^{cm}, 243^{cm}, 201^{cm}, $167^{cm} \ldots$

Fünfte Abtheilung.

Die Lehre vom Schalle oder die Akustik.

1. Definitionen der Akustik.

Begriff und Arten des Schalles. Unter dem Schalle versteht man die Einwirkung schwingender Bewegungen auf das Gehörorgan und die Gehörnerven. 235

Daß wirklich der Schall durch Schwingungen entsteht, lehrt in vielen Fällen eine genauere Betrachtung des schallenden Körpers, sowie die Thatsache, daß schallende Körper verstummen, wenn man durch Festhalten ihre Bewegung hemmt; in anderen Fällen überzeugt man sich durch Versuche; tönende Saiten werfen aufgesetzte Reiter aus Papier ab; Sand, der auf tönende Platten gestreut wird, hüpft heftig auf und nieder; läßt man in das Innere einer aufrechten tönenden Glaspfeife an Fäden eine mit Sand bestreute Membran hinab, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung; ebenso zittert Bärlappsamen hin und her, wenn derselbe in eine gläserne Röhre gebracht und diese dann durch Reiben zum Tönen gebracht wird (Kundt 1866). Am schönsten kann man sonst unsichtbare Schwingungen schallender Körper z. B. tönender Stimmgabeln durch Lissajous' Lichtfiguren (1855) sichtbar machen. An einer Stimmgabel ist ein Spiegelchen befestigt, auf welches man in einem dunkeln Raume einen Lichtstrahl fallen läßt; von dem Spiegelchen reflectirt, fällt der Strahl auf einen zweiten Spiegel und wird von diesem auf eine Tafel geworfen. Dort entsteht hierdurch ein Lichtpunkt, wenn die Stimmgabel ruht; tönt dieselbe aber, so vibrirt der Punkt hin und her und bildet dadurch einen Lichtstreifen; dreht man während des Tönens den zweiten Spiegel, so entsteht auf der Tafel eine regelmäßige leuchtende Wellenlinie. — Bringt man in eine Glaspfeife feinsten Kieselstaub, so schwebt derselbe, von der Sonne beschienen, in Form glänzender Punkte in der ruhenden Pfeife; aber sowie dieselbe tönt, verwandeln sich alle Punkte in glänzende Linien; betrachtet man dieselben in einem Spiegel, der um eine den Linien parallele Achse gedreht wird, so erscheint jede Linie als eine glänzende Welle (Mach 1872). Betrachtet man eine tönende Saite durch eine stroboskopische Scheibe, d. i. durch eine undurchsichtige, an ihren Rändern mit Schlitzen versehene rotirende Scheibe, so kann man bei gehöriger Regulirung der Drehgeschw. die Schw. der Saite deutlich verfolgen (Plateau 1836, Töpler 1866). (Erklärung der stroboskopischen Scheiben s. 346.) Volkmann ist es (1882) gelungen, die Luftbewegung gesprochener Vokale zu photographiren; für die einfachsten Töne ergaben sich auch die einfachsten Wellen. — Die Schw. eines Körpers üben, ähnlich einer explodirenden Knallgasblase, Stöße auf die Luft aus, die sich auf das Ohr fortpflanzen. Damit dieselben hier den Eindruck des Schalles erzeugen, müssen die Amplitude oder Schwingungsweite und die Schwingungsgeschw. über gewisse Grenzen hinausgehen, und die Schwingungszahl nicht unterhalb und oberhalb gewisser Grenzen bleiben. Eine einzige Schw. oder eine geringe Anzahl von Schw. ist nur hörbar, wenn wie bei einer Explosion, die Amplitude und die Schwingungsgeschw. groß sind; die Pendelschw. sind trotz großer Amplitude wegen zu geringer Geschw. ohne Eindruck auf das Gehör, während bei einer leise tönenden Saite die auch für das schärfste Auge unsichtbaren Schw. doch noch hörbar sind, weil sie wegen ihrer großen Schnelligkeit eine größere lebendige Kraft enthalten und daher heftigere Stöße auf die Luft ausüben. Bei zu großer Schwingungszahl

geht der Schall in Wärme über. Die Schallschw. unterscheiden sich aber von denen des Lichtes und der Wärme nicht blos durch geringere Zahl, sondern auch durch viel größere Amplituden und dadurch, daß viele Theilchen vereint an einer Schw. Theil nehmen.

Nach der Zahl und der Beschaffenheit der Schwingungen lassen sich folgende Arten von Schall unterscheiden: der **Knall** besteht aus einer oder einigen großen und raschen Schwingungen; ist die Weite derselben klein, so sinkt der Knall zum **Knistern** herab. Folgen mehrere stärkere, fast gleiche Knalle auf einander, so entsteht das **Rasseln** und das **Rollen**; schwächere, aber etwas rascher auf einander folgende Knalle bilden das **Rauschen**, **Brausen** u. a. ähnliche Schalle. Der **Ton** besteht aus einer größeren Zahl von ganz gleichen, schnellen Schwingungen, das Geräusch aus ungleichen und unregelmäßig eintretenden Schwingungen.

Diese Unterschiede sind ebenfalls durch einfache Beobachtungen oder Schlüsse aufzufinden; indessen lassen sich dieselben auch sichtbar machen, am besten mit Scotts **Phonautograph** (φωνή = Ton, αὐτός = selbst, γράφω = schreiben) (1859), verbessert von König. Dieser Apparat besteht (Fig. 146) aus einem großen hohlen Paraboloid von Zinkblech, das an seinem Scheitelende am Brennpunkte offen und hier mit einer Membran überzogen ist; diese trägt ein leichtes Federchen, dessen Spitze den Mantel eines Cylinders berührt. Der Cylinder wird mittels einer Kurbel um seine Achse gedreht und, da diese eine Schraube ist, auch bei jeder Umdrehung etwas vorangeschoben. Auf dem Mantel befindet sich eine Hülle von berußtem Papier. Wird nun ein Schall erregt, so werden dessen Schwingungen auf der Membran vereinigt und durch das Federchen auf das berußte Papier geschrieben. Ein Knall gibt eine große und meist noch mehrere kleine Wellen, ein Ton eine größere Zahl ganz gleicher Wellen u. s. w. Nach Mach und Weltrubsky (1878) hat die Welle des elektr. Funkens eine steil abfallende Verdichtungscurve und eine flach verlaufende Verdünnungscurve.

Fig. 146.



Da der Schall durch Schwingungen eines begrenzten Körpers entsteht, so werden dessen Schwingungen an seiner Grenze reflectirt und bilden **durch Interferenz** mit den ursprünglichen Schwingungen **stehende Wellen**. So bestehen also die meisten Schallarten aus stehenden Schwingungen elastischer Körper, wie es z. B. für die Saitentöne der Augenschein zeigt.

236 **Ausbreitung des Schalles** (Newton 1687). Das **gewöhnliche Medium für die Ausbreitung des Schalles ist die Luft**, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil die schallenden Körper sich meist, ebenso wie das Gehörorgan, in der Luft befinden. **Durch den luftleeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort**, weil der leere Raum keine Körperschwingungen vollbringen kann. Man kann dies nachweisen durch einen zum Schlagen gebrachten Wecker, den man unter die Glocke einer Luftpumpe setzt; je mehr man auspumpt, desto schwächer wird der Schlag; doch gelingt der Versuch nur dann gut, wenn der

Wecker entweder an Fäden aufgehängt oder auf Watte gebettet ist. Liegt der Wecker direct auf dem Teller, so wird der Schall selbst bei der stärksten Entleerung nicht sehr schwach; **denn die festen und flüssigen Körper pflanzen den Schall ebenfalls und sogar besser fort als die Luftarten**, weil sie eine größere Kraft der Elasticität besitzen als diese.

Beweis: In dem Ausdrucke $\sqrt{(e/d)}$ wächst e mehr als d; Nachweise dafür sind: Hält man an das eine Ende eines langen Balkens eine Taschenuhr, so kann man am anderen Ende das Ticken derselben hören. — Wheatstone ließ aus dem Keller seines Hauses vier Stangen von Tannenholz durch die Wölbungen und Decken in ein oberes Stockwerk gehen, welche Stangen mit einem Klavier, einer Violine, einem Violoncell und einer Clarinette im Keller in Verbindung standen, und bereitete so seinen Gästen ein unsichtbares Concert. — Bei dem Anfertigen von Telegraphenleitungen liegen die Drähte oft Meilen lang auf dem Boden; wird an dem einen Ende eines solchen Drahtes gefeilt, so hört man das Knirschen der Feile an dem anderen Ende, besonders wenn man das Ende ins Ohr oder zwischen die Zähne nimmt. — Auf der genauen Fortpflanzung eines Schalles mit seinen meisten Eigenthümlichkeiten durch einen Eisendraht oder Faden, die auch schon Hooke (1667) beobachtet hatte, beruht das Fadentelephon von Weinhold (1872); Millar beobachtete (1878), daß auch ein Kupferdraht Töne und Vokale auf 150 Yards deutlich übertrug, aber das Sprechen nur undeutlich. — Der Blitzdonner ist höchstens 4 M., der Geschützdonner Hunderte von M. hörbar. — Setzt man eine schwingende Stimmgabel mit ihrem Fuße in das Wasser einer Röhre, deren Boden ein großes elastisches Brett ist, so klingt der Ton laut auf. — Die Sirene, ein später zu beschreibender Apparat, singt auch unter Wasser.

Die Ausbreitung des Schalles geschieht in allen Medien durch fortschreitende Longitudinalwellen. Denn jeder schallende, also schwingende Körper übt, wenn er aus seiner Gleichgewichtslage herausgeht, einen Stoß auf das umliegende Medium aus. Die nächsten Theilchen dieses Mediums werden daher voranbewegt; sie stoßen folglich in der Richtung ihrer Bewegung auf die folgenden Theilchen und versetzen dieselben in eine fortschreitende Bewegung von derselben Richtung. Diese Theilchen wiederholen denselben Vorgang, und so bewegen sich nach und nach alle Theilchen in derselben Richtung, in der sich die Bewegung fortpflanzt; da nun auch alle Theilchen wieder zurückkehren müssen, so haben wir eine longitudinale Wellenbewegung, deren Eigenschaften wir noch etwas näher untersuchen wollen.

Der erste Stoß des schwingenden Körpers überträgt sich auf die Theilchen des Mediums bis in um so größere Entfernung, je größer die Elasticität desselben ist; die ersten dieser Theilchen haben, wenn der schwingende Körper den größten Ausschlag erreicht hat, nahezu dieselbe Bewegung vollendet, die folgenden haben einen kleineren Weg zurückgelegt, und die letzten dieser Theilchen beginnen erst ihre Bewegung; folglich müssen die Theilchen sich einander genähert haben, das Medium muß verdichtet sein. Geht die Bewegung jedes Theilchens pendelartig vor sich, so haben die ersten und die letzten Theilchen die kleinste, die mittleren die größte Geschw.; folglich muß bei diesen die Verdichtung am stärksten sein, und so wie die Theilchen nach und nach die größte Geschw. erreichen, so muß auch die Stelle der größten Verdichtung immer weiter voranschreiten, während an der eben betrachteten Stelle eine Verdünnung eintritt. Denn die ersten Theilchen des Mediums neben dem schwingenden Körper kommen fast mit diesem zur Ruhe, und kehren fast mit diesem pendelartig in die ursprüngliche Lage zurück. Während dieses Rückganges sind die mittleren Theilchen allmälig zur Ruhe gekommen und umgekehrt, die letzten haben ihre größte vorangehende Geschw. erreicht und sind danach zur Ruhe gelangt. Folglich haben sich diese Theilchen von einander entfernt, die ganze, früher verdichtete Stelle ist jetzt verdünnt; die größte Verdünnung ist an der Stelle der größten Geschw., also wieder in der Mitte, weil die ersten Theilchen am Schlusse ihres pendelartigen Rückweges und die letzten im Beginne desselben sind und daher die kleinsten Geschw. haben. Wie also alle Theilchen der jetzt verdünnten Stelle in der Rückkehr begriffen sind, so sind alle Theilchen der indessen entstandenen Verdichtung im Vorangehen, zwischen beiden sind die Theilchen in Ruhe. Verdichtung und Verdünnung bilden mit einander eine Welle, für welche, wie leicht ersichtlich, die früher gefundenen Sätze gelten. — Diese fortschreitenden Longitudinalwellen lassen sich sichtbar machen mit Wheatstones Wellenapparat oder mit Müllers Wellenscheibe. **Die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft** ist bei gewöhnlicher Temperatur $c^a = 333^m$.

Bei dieser Erklärung der Fortpflanzungswellen sind die Moleküle als ruhend gedacht;

nach der kinetischen Gastheorie sind dieselben wenigstens in den Gasen in der heftigsten fortschreitenden Bewegung. Hoorweg (1876) und Tolver Preston (1877) suchen die Fortpflanzung der Wellen demgemäß umzugestalten. Nach Letzterem erhalten die Gasmoleküle, die z. B. auf eine voranschwingende Stimmgabel treffen, einen Zuwachs an Geschw. in der Richtung des Voranschwingens, geben diesen an die folgenden Mol. ab und kehren mit der normalen Geschw. um. In der sogenannten Verdichtungswelle bewegen sich also die Mol. mit größerer Geschw. voran und mit der normalen zurück, in der Verdünnungswelle dagegen mit geringerer Geschw. voran als zurück. Hiernach müßte die Schallgeschw. mit der molekularen Geschw. der Gase zusammenhängen. Schon Schramm hat (1872) berechnet, daß sie ²/₃ der molekularen Geschw. beträgt, also für Luft ²/₃ von 500 d. i. 333ᵐ, womit auch Hoorweg und Preston übereinstimmen.

237 **Der Ton.** Der wichtigste Schall ist der Ton. Der Ton besteht aus periodischen Bewegungen, d. h. aus Schwingungen, welche gleiche Dauer, gleiche Amplitude und gleiche Form haben. Hiernach unterscheidet man an den Tönen drei Qualitäten: Tonhöhe, Tonstärke und Tonfarbe. Die Tonhöhe ist der Eindruck der Schwingungsdauer; ein Ton ist um so näher, je kleiner die Dauer oder je größer die Zahl seiner Schwingungen (in 1 Sec.) ist. Die Tonstärke oder Intensität des Tones ist der Eindruck der lebendigen Kraft der Schwingungen; sie steht deßhalb in gesetzmäßigem Zusammenhange mit der Amplitude und mit der Schwingungsgeschwindigkeit. Die Tonfarbe oder die Klangfarbe ist der Eindruck der Form der Schwingungen; denn eine wesentlich andere Schwingungsform muß einem Tone von derselben Höhe und derselben Stärke offenbar einen anderen Charakter, ein anderes Gepräge geben, das man eben mit dem Namen Tonfarbe oder Klangfarbe bezeichnet. Diese drei Definitionen sind durch Versuche festzustellen; wir betrachten zuerst die Tonhöhe.

Die Tonhöhe wächst mit der Schwingungszahl des Tones (Mersenne 1636).

Hält man ein Kartenblatt gegen die Zähne eines sich drehenden Zahnrades, so entsteht ein Ton, der um so höher wird, je schneller man das Rad dreht. — Drückt man eine Stricknadel zum Theil fest auf eine Tischplatte und läßt den hervorragenden Theil schwingen, so sieht man denselben um so schneller schwingen und hört ihn um so höher tönen, je kürzer er ist. — Legt man Trevelyans Wackler (1829), eine mit stumpfwinkliger Doppelkante versehene Metallplatte, in erhitztem Zustande auf einen Bleiklotz, so wird das Blei erhitzt und stößt durch seine Ausdehnung den Wackler bald an der einen, bald an der andern Kante ab; dadurch wackelt das Instrument auf dem Bleiklotze hin und her und gibt einen um so höheren Ton, je schneller die Wiegung vor sich geht. — Am besten aber ist die Definition der Tonhöhe ersichtlich durch die Sirene. Seebecks Scheibensirene (1837) besteht aus einer auf der Schwungmaschine rasch drehbaren Scheibe von Pappe (oder auch von Metall), welche einen oder mehrere Kreise von Löchern enthält. Bläst man mit einem Rohre auf den Löcherkreis, so wird in jedem Augenblicke, wo ein Loch unter dem Rohre vorbeigeht, ein Stoß auf die jenseits befindliche Luft ausgeübt; folglich entstehen bei jeder Umdrehung soviele Schw., als die Sirene Löcher hat; je schneller man nun dreht, um so höher wird der Ton. — Macht man die Schw. zweier Töne nach Lissajous' Methode leuchtend, so sieht man, daß dem höheren Tone auf derselben Strecke der Tafel mehr leuchtende Wellen zugehören, als dem tieferen.

Fig. 147.

238 **Das Zählen der Schwingungen eines Tones.** Sehr geeignet zum Auffinden der Schwingungszahl (Schwz.) eines Tones ist die Sirene von Cagniard-Latour (1825) (Fig. 147), bei welcher das durchlöcherte Rad von dem Luftstrome selbst gedreht wird. Zu diesem Zwecke dient eine kleine Metalltrommel, der Windkasten B, die mit einer Bodenröhre R auf einen Blastisch gesetzt wird und so den Luftstrom aufnimmt; der Deckel trägt im Kreise stehende, schief gebohrte Löcher. Unmittelbar über dem Deckel sitzt das Sirenenrad C, das in einem gleichen Kreise nach entgegengesetzter Richtung schief gebohrte Löcher hat. Gehen nun die Luftströme aus den Oeffnungen des Deckels, so stoßen sie gegen die Löcherwände des Rades und drehen dasselbe. Durch stärkeres Anblasen dreht sich das Rad immer schneller und gibt einen immer höheren Ton, der wegen der größeren Anzahl der wirksamen Luftströme auch eine ziemliche Stärke erreicht. Das Sirenenrad sitzt auf einer Achse AF, welche durch eine

Schraube ohne Ende in ein Zahnrad eines Zählwerkes eingreift. Hat durch Reguliren des Anblasens der Ton eine gleich bleibende Höhe erreicht, so setzt man durch einen Druck auf die Feder f das Zählwerk in Thätigkeit und hemmt es nach einer bestimmten Zeit z. B. nach 1 Min. durch einen Druck auf den Knopf a; an den Zeigern des Zählwerkes findet man die Zahl der Umdrehungen des Sirenenrades; diese multiplicirt mit der Zahl der Löcher und dividirt durch 60 gibt die Schwz. des Tones.

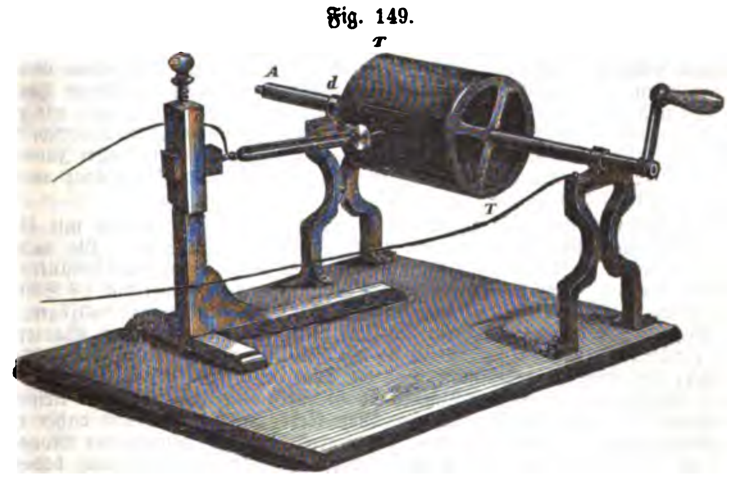
Um die Schwz. eines Tones eines anderen Instrumentes zu bestimmen, setzt man die Sirene allmälig in Gang; nähert sich ihr Ton dem fraglichen, so entstehen, wie später erhellen wird, Stöße oder Schwebungen, deren Zahl immer kleiner wird, und welche bei völliger Uebereinstimmung der beiden Töne ganz verschwinden. Stimmt z. B. der Sirenenton mit dem eingestrichenen a (geschrieben ā oder nach Sondhauß a_1), also mit dem Tone, den die Instrumente beim Stimmen vorzugsweise hören

Fig. 148.



lassen, den eine Frauenstimme mit Leichtigkeit, eine Tenorstimme nur mit einiger Anstrengung singen kann, und findet sich, daß ein Sirenenrad mit 15 Löchern 1750 Drehungen in 1 Minute macht, so ist die Schwz. von $a_1 = 1750 . 15 / 60 = 437^1/_2$. Auch mit Scotts Phonautograph, sowie mit jedem anderen Vibrograph kann man die Schwz. bestimmen, wenn derselbe mit einer Vorrichtung versehen ist, die den Anfangs- und den Endpunkt der Zeit auf der Wellenlinie bezeichnet. Der Gedanke der **Vibrographie** rührt von Wilhelm Weber (1830) her; doch bestand dessen Apparat (Fig. 148) nur aus einer berußten Glasplatte, über welche er eine mit einem Federchen versehene tönende Stimmgabel mit der Hand gleichmäßig hinführte. Duhamels **Vibrograph** (1859) (Fig. 149) besteht aus einem durch eine Schraubenachse drehbaren und verschiebbaren Cylinder T mit einem Mantel von

Fig. 149.



berußtem Papier, auf dem ein mit dem tönenden Körper verbundenes Federchen schleift. Dieses Federchen zeichnet die Wellenlinie des Tones auf das Papier; markirt nun ein Zeitapparat auf dieser Linie den Anfangs- und den Endpunkt einer Sec., so gibt die Zahl der Wellen zwischen den beiden Marken die Schwz. — Auch mittels Appunns Tonmesser (1865), der auf den Stößen (s. 266.) beruht, kann man die Schwz. von Tönen genau finden, am genauesten mit Königs Sonometer, der aus zuverlässigen, mit ihren Schwingungszahlen versehenen Stimmgabeln zusammengesetzt ist.

Tiefste und höchste Töne. Nicht jede beliebige Schwz. wird von dem menschlichen Ohre als Ton empfunden; nach Helmholtz beginnt die Tonempfindung bei 30 Schw., er-

reicht aber erst bei 40 Schw. eine bestimmte musikalische Höhe. Weniger als 30 Schw. bringen mehr den Eindruck einzelner Stöße hervor; doch will Savart noch 8 sehr starke Stöße zu einem Tone vereinigt gehört haben. Noch weniger Sicherheit herrscht über die obere Grenze, besonders deßhalb, weil die Ohren an Wahrnehmungsfähigkeit der höchsten Töne verschieden sind; es ist belustigend, in einer Gesellschaft Jemand über den schrillen Ton einer kleinen Pfeife klagen zu hören, während Andere behaupten, daß dieselbe gar nicht töne (John Herschel). Brewster hörte das Zirpen einer Grille nur mit einem Ohre; als Tyndall auf der Wengernalp sich über die Musik zahlreicher Insecten freute, war sein mitwandernder Freund ganz taub für dieselbe. Savart und Andere verlegen die obere Grenze auf 38000 Schw. — Ueber die „Grenzen der Tonwahrnehmung" liegen entscheidende Untersuchungen von Preyer (1876) vor. Für die Wahrnehmung der tiefsten Töne hat derselbe den Grundtöneapparat construirt, aus Appunn'schen Zungen bestehend, welche 8 bis 40 Schw. in 1 Secunde vollziehen und noch weiter schwingen, wenn ihre Obertöne schon verklungen sind. Die Versuche ergaben, daß 8—14 Schw. wohl gesehen und als Luftstöße gespürt, aber nicht gehört werden, daß 14 bis 24 Schw. von dem Einen gehört werden, von dem Anderen nicht, daß aber 24 Schw. von jedem normalen Gehör als tiefer, mild summender Ton empfunden werden. Für die höchsten Töne ist Appunns Tongrenzeapparat construirt worden, der aus 31 sehr kleinen Stimmgabeln besteht, von denen die größte c_4 = 2048 Schw. und die kleinste e_8 = 40960 Schw. erzeugt, wenn sie mit Violinbogen gestrichen werden. Die höchsten Töne sind für viele, besonders für ältere Leute unhörbar; andere hören alle Töne, jedoch mit schmerzhaften Nebenempfindungen, z. B. als ob in das Ohr mit einer sehr feinen Nadel hineingestochen würde. Manche Physiker hatten schon die Vermuthung ausgesprochen, daß die obere Grenze der Hörbarkeit für dasselbe Ohr mit der Tonstärke steigen könne; dies bestätigte Pauchon (1883), indem er eine kräftige Sirene mit Dampf anblies; mit Dampf von $^1/_2$at lag die obere Grenze bei 48000, von $1^1/_2$at bei 60000 Schw. und bei $2^1/_2$at war sie selbst bei 72000 Schw. noch nicht erreicht; durch ein Hörrohr wird die obere Grenze erhöht und bei Stabtönen besonders durch das Material verändert, mit welchem der Stab gerieben wurde. — In den letzten Jahren beschäftigte man sich mit der Frage, wieviele Schw. irgend eines Tones von beliebiger Tonhöhe wenigstens stattfinden müssen, um ihn als Ton wahrnehmen zu können. Exner (1876) glaubte aus physiologischen Gründen, die Schwz. 17 als untere Grenze der Tonwahrnehmbarkeit angeben zu können; Pfaundler (1878) glaubte, schon 2 Schw. müßten dafür ausreichen und führt dafür den Reflexionston an, welcher nach Baumgartner (1877) gehört wird, wenn man z. B. ein Bachgeräusch und dessen Reflexion von einer Wand gleichzeitig hört, sowie auch Sirenenversuche, die er jedoch selbst für zweifelhaft erklärt. Auerbach (1879) führt verschiedene Gründe für die Grenze 20 an. Kohlrausch untersuchte (1880), wie viele Schw. ein sehr kurzer Ton wenigstens haben müsse, um von einem langen Tone unterschieden zu werden, und wie groß das Intervall sein müsse, damit der Ton bei einer gewissen Zahl von Schw. unterscheidbar sei. Er fand, daß schon 2 Schw. unterscheidbar seien, aber nur bei einem großen Intervall von wenigstens $^{24}/_{25}$, daß dieses Intervall immer kleiner werde, wenn die Schwz. wachse und bei etwa 16 Schw. constant = $^{249}/_{250}$ bleibe.

Im Orchester ist der tiefste Ton das Contra-E (e_{-2}) des Contrabasses mit 41 Schw., der höchste das fünfgestrichene d (d_5) der Piccoloflöte mit 4752 Schw. Die menschlichen Singstimmen liegen zwischen 64 und 1500 Schw., höher scheinen einige Consonanten zu sein. Flügel gehen bis zu a_{-3} von 27 Schw., große Orgeln sogar bis zu c_{-3} mit 16 Schw.; doch meint Helmholtz, daß diese tiefsten Orgeltöne durchaus nicht so wenig Schw. vollzögen, sondern ein Gemisch von Obertönen seien. In der Höhe wird die Pfeife von den Klavieren nicht erreicht; dieselben gehen meist nur bis zu a_4 mit 3520, manche bis zu c_5 mit 4224 Schw. Höher noch, aber nicht ganz bestimmt, sind die Töne der Vögel, der Grillen und anderer Insecten; nach Untersuchungen von Landois (1869) haben viele Insecten, z. B. kleine Fliegen und Bockkäfer Stimmen, die für das menschliche Gehör zu hoch sind und daher von uns nicht wahrgenommen werden. Der tiefste Insectenton scheint der Flugton der Mooshummel a = 217 zu sein; der Flugton der Bienen und Fliegen ist meist eine Octave höher, etwa = 400; nicht viel höher sind die Stimmen der Hummeln, Mücken und Fliegen, etwa 500—600 Schw.; die Stimmen der Bienen aber liegen höher, bei 1000—1500 Schw. — Die menschliche Pfeifstimme liegt zwischen c_2 und c_5. — Während die Töne nach Preyer überhaupt durch die Zahlen 14 und 40000 begrenzt sind, liegen die musikalisch brauchbaren zwischen 40 und 5000 Schw.

239 **Die Intervalle.** Unter dem Intervall zweier Töne versteht man den Höhenabstand derselben, ausgedrückt durch das Verhältniß der Schwingungszahlen. In der Musik sind nur solche Töne zugelassen, deren Schwingungszahlen in einem einfachen, der Zahl 1 nicht zu nahe liegenden Verhältnisse zu einander stehen;

dieses Verhältniß drückt den Höhenabstand der Töne von einander aus und wird daher ebenso, wie dieser, Intervall genannt. Die einfachsten Intervalle bilden diejenigen Töne, welche 2, 3, 4, 5 .... mal so viel Schwingungen haben, als ein anderer Ton, den man, um die Begriffe zu fixiren, den Grundton nennt; diese Töne haben den Namen „die harmonischen Obertöne" des Grundtones erhalten. Der Ton, welcher 2 mal so viel Schwingungen als der Grundton enthält, dessen Intervall also 2 : 1 ist, wird die Octave genannt. Weil sein Verhältniß zu dem Grundtone das denkbar einfachste ist, so erscheint unserem Gehöre dieser Ton auch sehr nahe mit dem Grundtone verwandt, so nahe, daß wir ihn sogar mit demselben Buchstaben bezeichnen, daß wir ihn denselben Ton eine Octave höher nennen. Da nun noch viele Verhältnisse möglich erscheinen, die kleiner als 2 : 1 und dennoch einfach sind, so liegt auch zwischen dem Grundtone und seiner Octave noch eine Anzahl von Intervallen. Die nächst einfachen Verhältnisse sind $1\frac{1}{2} : 1$ oder 3 : 2 und $1\frac{1}{4} : 1$ oder 5 : 4; man nennt die Töne, welche $\frac{3}{2}$ und $\frac{5}{4}$ mal so viel Schwingungen haben als der Grundton, die Quinte und die Terz des Grundtones; dieselben erscheinen dem Gehöre noch sehr nahe verwandt mit dem Grundtone, sie machen beim Zusammentönen mit demselben einen angenehmen Eindruck. Das Intervall $1\frac{3}{4} : 1$ oder 7 : 4 wird in der Musik nicht angewendet; nach Helmholtz macht dasselbe zwar an sich noch einen günstigen Eindruck, obgleich man aus der geringen Einfachheit und Unzerlegbarkeit der Zahl 7 das Gegentheil schließen sollte; allein es steht zu der Octave 2 in dem zu complicirten Verhältnisse 8 : 7 und läßt daher keine Verbindung mit der Octave, keine Umkehrung zu; ebenso fehlen auch die Intervalle, die durch noch größere Primzahlen 11, 13, 17 ... ausgedrückt werden. Die nächst einfachen Verhältnisse sind offenbar $1\frac{1}{3} : 1$ oder 4 : 3 und $1\frac{2}{3} : 1$ oder 5 : 3; die Töne, welche $\frac{4}{3}$ und $\frac{5}{3}$ mal so viel Schwingungen als der Grundton enthalten, werden die Quarte und die Sexte genannt; sie klingen ebenfalls noch befriedigend mit dem Grundtone zusammen. Man nennt solche Töne, welche zusammen einen angenehmen Eindruck auf das Gehör machen, consonirend oder consonant und das Zusammentönen selbst eine Consonanz; diejenigen Töne dagegen, welche zusammen unangenehm auf das Ohr wirken, werden dissonirend oder dissonant und ihr Zusammenklang eine Dissonanz genannt. Die fünf genannten Töne bilden mit dem Grundtone Consonanzen; die außer ihnen noch denkbaren bilden unvollkommenere Consonanzen oder gar Dissonanzen, weil ihr Schwingungszahlenverhältniß zu dem Grundtone nicht mehr einfach ist. Wegen der leichten Theilbarkeit der Zahl 8 liegen die Verhältnisse mit dem Nenner 8 noch am nächsten; $\frac{11}{8}$ und $\frac{13}{8}$ sind ausgeschlossen; also bleiben nur noch $\frac{9}{8}$ und $\frac{15}{8}$. Diese Verhältnisse geben zwar keine consonanten Töne; doch füllt $\frac{9}{8}$ die zu große Lücke zwischen 1 und $\frac{5}{4}$, ebenso wie $\frac{15}{8}$ die Lücke zwischen $\frac{5}{3}$ und 2 ausfüllt. Deßhalb und aus anderen später erhellenden Gründen sind die Töne, welche $\frac{9}{8}$ und $\frac{15}{8}$ mal so viel Schwingungen als der Grundton vollführen, in die Reihe der genannten 6 Töne eingeschoben. Das Intervall $\frac{9}{8}$, welches dem Grundtone oder der Prime am nächsten liegt, heißt deßhalb Secunde, und das Intervall $\frac{15}{8}$ aus gleichem Grunde die Septime. Auch die Namen aller übrigen Intervalle erklären sich aus der Stellung in der nun folgenden Reihe der 8 einfachsten Intervalle, welche Reihe diatonische Tonleiter genannt wird:

Prime,	Secunde,	Terz,	Quarte,	Quinte,	Sexte,	Septime,	Octave.
1/1,	9/8,	5/4,	4/3,	3/2,	5/3,	15/8,	2/1.

Man kann diese Verhältnisse nachweisen durch eine Sirene mit 8 Löcherkreisen, von denen der kleinste z. B. 24 Löcher enthält; finden sich in den anderen Kreisen $\frac{9}{8} \cdot 24 = 27$,

$^5/_4 . 24 = 30$, $^4/_3 . 24 = 32$, $^3/_2 . 24 = 36$, $^5/_3 . 24 = 40$, $^{15}/_8 . 24 = 45$, $2 . 24 = 48$ Löcher, und bläst man bei gleich bleibender Drehungsgeschwindigkeit die Kreise nach und nach an, so hört man die bekannten Töne der diatonischen Tonleiter.

Um die Intervalle besser benennen und in den verschiedenen Octaven (wie man auch die ganze Tönezahl zwischen Grundton und Octave nennt) besser unterscheiden zu können, als es mit jenen Wortnamen möglich ist, hat man Buchstaben oder Silbennamen eingeführt, in den nördlichen Ländern die Buchstaben c, d, e, f, g, a, h, c, in den südlichen die Silben ut (do), re, mi, fa, sol, la, si. Diese letzteren wurden 1026 von dem Benedictiner Guido Arezzo aus folgender Strophe entnommen:

Ut queant laxis resonare fibris
Mira gestorum famuli tuorum.
Solve polluti labii reatum
Sancte Johannes.

Von demselben Musiker rührt auch die Schreibweise der Töne als Noten auf Notenlinien mit verschiedenen Schlüsseln her. Die in Deutschland übliche Buchstabenbenennung ist älter und hat wahrscheinlich ihren Urheber in Gregor dem Großen (591—604), vielleicht schon in St. Ambrosius (geb. 353). Ursprünglich hatte man die Buchstaben in alphabetischer Reihenfolge a, b, c, d, e, f, g, worin b unser $h = {}^{15}/_8$ bedeutete. Später wurde noch ein Ton zwischen a und b eingeschoben und ebenfalls b genannt; zum Unterschiede von dem damals üblichen gothischen b (b quadratum = ♮), aus welchem die Bezeichnung h hervorgegangen ist, gab man dem eingeschobenen Tone das lateinische b (b rotundum) als Zeichen, wodurch dieser Ton die auch jetzt noch gebräuchliche, ganz abweichende Benennung hat. Diese einmal eingeführten Namen für die älteste Tonleiter wurden auch beibehalten, als man erkannte, daß die Tonleiter mit dem Grundtone c die eigentliche Normaltonleiter ist, weil in derselben die Noten d, e, f, g, h, a, c ohne weitere Veränderung die Reihe der oben betrachteten Hauptintervalle geben; hierdurch erklärt es sich, daß unsere gewöhnliche Tonleiter die alphabetische Reihenfolge verloren hat.

Die diatonische Tonleiter wird nicht blos auf dem einen Grundtone c, sondern auch auf dessen höheren und tieferen Octaven aufgebaut; die Töne dieser neuen Tonleitern sind ebenfalls die Octaven der ersten und werden daher mit denselben Buchstaben bezeichnet. Um aber die verschiedenen gleichnamigen Töne unterscheiden zu können, hat man auch den Octaven Namen gegeben. So wird die Octave in der Mitte der Männerstimmen die kleine Octave genannt und demgemäß mit kleinen Buchstaben (c bis h) geschrieben; die nächst höhere Octave, in der Mitte der Frauenstimmen, heißt die eingestrichene, die folgende die zweigestrichene u. s. w., und werden dieselben in der Musik mit 1, 2, 3 . . . Querstrichen über den kleinen Buchstaben geschrieben, in der Akustik mit den positiven Indexen 1, 2, 3 u. s. w. Die Octave unter der kleinen heißt die große; sie wird mit großen Buchstaben geschrieben; die Octaven unter derselben erhalten 1, 2, 3 . . . Querstriche unter den großen Buchstaben und heißen Contra-Octave, Subcontra-Octave, dreimal unterstrichene Octave; in der Akustik setzt man statt dessen kleine Buchstaben mit negativen Indexen. Zur Vergleichung dient nachstehende Tabelle.

Subcontra-C = $\underline{\underline{C}}$	c_{-3}	C_2	C''	ut_{-1}
Contra C = $\underline{C}$	c_{-2}	C_1	C'	ut_0
Großes C = C	c_{-1}	C	C	ut_1
Kleines c = c	c	c	c	ut_2
Eingestriches c = $\overline{c}$	c_1	c_1	c'	ut_2
Zweigestrichenes c = $\overline{\overline{c}}$	c_2	c_2	c''	ut_4
Dreigestrichenes c = $\overline{\overline{\overline{c}}}$	c_3	c_3	c'''	ut_5 u. s. w.

Die harmonischen Obertöne eines Grundtones d. s. die Töne, welche 2, 3, 4, 5 . . . mal soviel Schwingungen enthalten als der Grundton, sind in der Akustik von besonderer Bedeutung, weil sie die Ursache der Klangfarbe bilden und ein wesentliches Element der Lehre von der Consonanz und Dissonanz ausmachen. Sie sind: der erste Oberton, 2 mal soviel Schwingungen, die höhere Octave; der zweite Oberton, 3 mal $= {}^3/_2 . 2$ mal soviel Schwingungen, die Quinte der Octave; der dritte Oberton, 4 mal soviel Schwingungen, die zweite Octave; der vierte Oberton, 5 mal $= {}^5/_4 . 4$ mal soviel Schwingungen, die Terz der zweiten Octave; der fünfte Oberton, 6 mal soviel Schw., die Quint der zweiten Octave; der sechste Oberton, 7 mal soviel Schw., ganz nahe die kleine Septime der zweiten Oc-

tave; der siebeute Oberton, 8 mal soviel Schw., die dritte Octave; der achte Oberton, 9 mal $= \frac{9}{8}$. 8 mal soviel Schw., die Secunde der dritten Octave; der neunte Oberton, 10 mal soviel Schw., die Terz der 3 ten Octave u. s. w. Man nennt die Obertöne mit 2, 4, 6, 8 ... facher Schwingungszahl auch die geradzahligen Obertöne, die mit 3, 5, 7, 9 ... facher Schwingungszahl auch die ungeradzahligen Obertöne. Helmholtz nennt sie mit dem Grundton zusammen auch Partialtöne eines Klanges; der Grundton ist der erste Partialton, der erste Oberton der zweite Partialton u. s. w.

240 **Ganze und halbe Töne.** Vergleicht man die Zwischenräume oder Intervalle von je zwei neben einander stehenden Tönen der diatonischen Tonleiter, indem man jedes folgende Verhältniß durch das vorhergehende dividirt, so ergibt sich, daß diese Intervalle einander nicht ganz gleich sind. Zwischen Prime und Secunde liegt das Intervall $\frac{9}{8}$, zwischen Secunde und Terz $\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$, sehr nahe $= \frac{9}{8}$, zwischen Terz und Quarte $\frac{16}{15}$, zwischen Quarte und Quinte $\frac{9}{8}$, zwischen Quinte und Sexte $\frac{10}{9}$, zwischen Sexte und Septime $\frac{9}{8}$, zwischen Septime und Octave $\frac{16}{15}$. Das große Intervall $\frac{9}{8}$ und das demselben sehr nahe liegende $\frac{10}{9}$ finden sich 5 mal; man nennt dieses Intervall einen g a n z e n T o n und unterscheidet nach den zwei Werthen des Intervalls einen g r o ß e n g a n z e n T o n $= \frac{9}{8}$ und einen k l e i n e n g a n z e n T o n $= \frac{10}{9}$. Das Intervall des großen und des kleinen ganzen Tones beträgt $\frac{81}{80}$ und wird K o m m a genannt. Das kleine Intervall $\frac{16}{15}$ findet sich in der ganzen Tonleiter nur 2 mal; man nennt dasselbe einen h a l b e n Ton, weil es ungefähr halb so groß ist als das Intervall des ganzen Tones. Es gibt indeß auch einen k l e i n e n h a l b e n T o n, nämlich das Intervall zwischen dem eben genannten halben Ton und dem kleinen ganzen Ton $= \frac{10}{9} : \frac{16}{15} = \frac{25}{24}$. Die Intervalle der ganzen Töne sind sehr groß, und die halben Töne sind noch leicht von einander zu unterscheiden; es liegt daher nahe, in diese großen Intervalle noch halbe Töne einzuschalten, die man entweder als Erhöhungen der vorausgehenden oder als Erniedrigungen der nachfolgenden Töne auffassen kann. Man bezeichnet sie im ersten Falle durch ein Kreuz (♯) vor der Note und durch die an den Buchstaben gehängte Silbe is (in Frankreich durch das Wort dièse), im zweiten Falle durch ein b vor der Note und die an den Buchstaben gehängte Silbe es (in Frankreich durch das Wort bèmol). Hierdurch sind vom Grundtone bis zur Octave 12, vom Grundtone bis zur Quinte 7 halbe Töne vorhanden, welche Tonleiter aus 12 halben Tönen man die c h r o m a t i s c h e T o n l e i t e r nennt. Die Einschaltung dieser halben Töne wird auch dadurch nöthig, daß man in der Musik jeden Ton als Grundton benutzen will. Will man den nächstverwandten Ton des Grundtones c, die Octave c_1 als Grundton gebrauchen, so sind dafür nur die Octaven der einzelnen Töne der diatonischen Tonleiter nöthig; diese reichen aber nicht aus, wenn man den nach der Verwandtschaft folgenden Ton, die Quinte g, als Grundton benutzen soll.

Alsdann ist vorhanden die Secunde a ; denn $a : g = \frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$, (nicht ganz $\frac{9}{8}$)
die Terz h ; denn $h : g = \frac{15}{8} : \frac{3}{2} = \frac{5}{4}$,
die Quarte c_1 ; denn $c_1 : g = 2 : \frac{3}{2} = \frac{4}{3}$,
die Quinte d_1 ; denn $d_1 : g = 2 . \frac{9}{8} : \frac{3}{2} = \frac{3}{2}$,
die Sexte e_1 ; denn $e_1 : g = 2 . \frac{5}{4} : \frac{3}{2} = \frac{5}{3}$,
aber es fehlt die Septime; denn $f_1 : g = 2 . \frac{4}{3} : \frac{3}{2} = \frac{16}{9}$, aber nicht $= \frac{15}{8}$.

Man muß folglich zwischen f_1 und g_1 einen Ton einschalten, der $\frac{15}{8}$ von g, also $\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$ von e_1 ist, der also von e_1 um einen ganzen Ton, folglich von f_1 um einen halben Ton entfernt liegt. Dieser Ton kann demnach als eine Erhöhung von f_1 um einen halben Ton, als fis_1 aufgefaßt werden; doch kann man ihn auch als eine Erniedrigung von g_1 um einen halben Ton, als ges_1 ansehen, weil $2 : \frac{16}{15} = \frac{15}{8}$. Aus dieser auf g sich erhebenden Tonleiter folgt auch die Nothwendigkeit der Secunde d und der Septime h von c; denn ohne diese zwei Töne würden die Quinte und die Terz von g fehlen. — So wie sich hier die Nothwendigkeit von fis odes ges ergab, so ergibt sich das Bedürfniß noch mehrerer halben Töne, wenn man außer c und g noch andere Töne als Grundtöne benutzen will;

für die folgende Quinte d als Grundton ist ein zweiter halber Ton zwischen c und d, cis oder des genannt, erforderlich, für eine weitere Quinte a ein dritter halber Ton gis oder as zwischen g und a u. s. w.; in derselben Weise zeigt sich, daß für jede folgende Quinte als Grundton ein neuer halber Ton nöthig ist. Hieraus würde folgen, daß unendlich viele halbe Töne verlangt werden müßten; doch ist dies nicht der Fall, weil man beim Fortschreiten in Quinten von c aus endlich wieder auf ein c zurückkommt, weil also die Quinten einen Cirkel in den Octaven bilden; dies ist schon daraus ersichtlich, daß 7 Octaven $7 . 12 = 84$ halbe Töne enthalten und 12 Quinten ebenfalls $12 . 7 = 84$ halbe Töne einschließen, wobei aber vorausgesetzt ist, daß die halben Töne überall dieselben sind. Ein solcher **Quintencirkel** ist z. B. folgende Notenreihe:

c_{-2}, g_{-2}, d_{-1}, a_{-1}, e, h, fis_1, cis_2, gis_2, dis_3, ais_3, eis_4, $his_4 = c_5$.

Da in dieser Reihe sämmtliche Töne der diatonischen Tonleiter stehen, so sind auch nur 11 Erhöhungen nöthig, von denen aber 7 schon Erhöhungen sind, also durch die zweite Erhöhung auf einen schon vorhandenen Ton kommen; folglich sind eigentlich nur fünf halbe Töne einzuschalten, nämlich zwischen c und d, d und e, f und g, g und a, a und h. Indessen müssen doch öfter mehr als 5, z. B. bei der Tonleiter auf dis 9 Erhöhungen vorgenommen werden; um die hierzu nöthigen 9 Kreuze zu umgehen, faßt man die letzten 5 oder 6 Noten als Erniedrigungen, eis als f, ais als b, dis als es, gis als as, cis als des, fis als ges und läßt auch die Noten der Tonleiter durch Erniedrigung geschehen, wodurch die vorausgegangenen Erhöhungen aufgehoben und dadurch nur wenige b als Vorzeichen nöthig werden. So ist z. B. die Tonleiter:

von dis als Erhöhung = dis, cis, fisis, gis, ais, his, cisis, dis,
von es als Erniedrigung = es, f, g, as, b, c, d, es; folglich sind statt 9 Kreuzen nur 3 b nöthig; ähnlich bei der Tonleiter von f oder eis statt 11 Kreuzen nur 1 b, wodurch die Schreibweise der Tonleitern viel einfacher wird.

Die chromatische Tonleiter enthält natürlich eine Reihe neuer Intervalle, die man durch die Wörter „übermäßig" und vermindert" oder auch „groß" und „klein" bezeichnet. Von besonderem Interesse sind die Töne, welche durch die Erniedrigung der Terz $^5/_4$ und der Sexte $^5/_3$ um einen kleinen halben Ton $^{25}/_{24}$ entstehen; dieselben stehen zum Grundtone in dem Verhältnisse $^5/_4 : {}^{25}/_{24} = {}^6/_5$ und $^5/_3 : {}^{25}/_{24} = {}^8/_5$, offenbar ziemlich einfache Verhältnisse, so daß diese Töne, die **kleine Terz** und die **kleine Sexte** zum Grundtone noch einigermaßen consonant sind. Aehnlich verhält es sich mit der kleinen Septime, die durch Erniedrigung der Septime $^{15}/_8$ um den kleinen halben Ton entsteht $= {}^{15}/_8 : {}^{25}/_{24} = {}^9/_5$. Die kleine Terz und die kleine Sexte können zwar auch als Erhöhungen der Secunde und der Quiute um den halben Ton $^{16}/_{15}$ aufgefaßt werden; in der Musik werden sie jedoch als Erniedrigungen der Terz und der Sexte aufgefaßt und durch b vor der Terz und der Sexte bezeichnet. Die Tonleiter, welche statt der Terz und der Sexte die kleine Terz und die kleine Sexte enthält, klingt nicht so befriedigend als jene, nicht so hell und heiter, mehr dunkel und düster; man nennt sie die Moll-Tonleiter und die andere mit der großen Terz und der großen Sexte die Dur-Tonleiter, Namen, welche von den bekannten Zeichen b für die zwei Erniedrigungen und ♮ für die Wiederauflösungen derselben hergenommen sind und durchaus nicht einen Gegensatz von weich und hart in dem Charakter der Tonarten ausdrücken sollen.

241 **Die Temperatur.** Diejenige Stimmung der Instrumente oder des Vortrages, durch welche alle Intervalle die angegebenen einfachsten Schwingungszahlenverhältnisse erhalten, nennt man die **natürlich reine Stimmung**. In der Normaltonleiter, der sogenannten c-dur Tonleiter findet sich zwischen Terz und Quarte, sowie zwischen Septime und Octave der halbe Ton $^{16}/_{15}$. Sollen alle anderen Tonleitern ebenfalls dieselbe natürlich reine Stimmung haben, so müßten auch alle halben Töne $= {}^{16}/_{15}$ sein. Diese Grundbedingung der natürlich reinen Stimmung ist aber nicht zu erfüllen, wenn man zwischen die 7 Töne der diatonischen Tonleiter nur noch 5 halbe Töne einschaltet, also nur die gewöhnliche chromatische Tonleiter anwendet. Hierdurch werden auch noch andere Grundbedingungen der natürlich reinen Stimmung nicht erfüllt, wie folgende Beispiele zeigen:

Zwei halbe Töne der chromatischen Tonleiter geben einen ganzen Ton; zwei reine halbe Töne nach einander erzeugen aber das Intervall $^{16}/_{15} . {}^{16}/_{15} = {}^{2048}/_{1800}$, das weder mit dem großen ganzen Tone $^9/_8 = {}^{2025}/_{1800}$, noch mit dem kleinen ganzen Tone $^{10}/_9 = {}^{2000}/_{1800}$ übereinstimmt. — In der chromatischen Tonleiter ist ein halber Ton eine Erhöhung des tieferen und gleichzeitig eine Erniedrigung des höheren Tones; eine Erhöhung von c aber um den reinen halben Ton gibt $^{16}/_{15}$, eine Erniedrigung des d um einen reinen halben Ton gibt $^{135}/_{128}$; folglich stimmt in der natürlich reinen Stimmung das cis nicht mit des überein, ebenso wenig dis mit es, fis mit ges u. s. w.; ein Instrument mit na-

türlich reiner Stimmung müßte zwischen je 2 ganzen Tönen zweierlei halbe Töne enthalten. — In der chromatischen Tonleiter ist z. B. a die Quinte von d, folglich müßte a = $^3/_2$ von $^9/_8$, also = $^{27}/_{16}$ sein; es ist aber $^5/_3$, was sich von $^{27}/_{16}$ um $^{81}/_{80}$ unterscheidet; in der natürlich reinen Stimmung müßte also z. B. ein anderes a für d-dur, als für c-dur vorhanden sein. — In der chromatischen Tonleiter geben drei große Terzen zu je 4 halben Tönen eine Octave von 12 halben Tönen; sollen aber die 3 großen Terzen natürlich rein = $^5/_4$ sein, so kommt man durch dieselben auf das Intervall $^5/_4 \cdot {}^5/_4 \cdot {}^5/_4 = {}^{125}/_{64}$, was von der Octave verschieden ist. Macht man also die 3 Terzen c—e, e—gis, gis—his rein, so wird die Octave unrein und umgekehrt. In der natürlich reinen Stimmung müßte c_1 als dritte Terz von c ein anderer Ton sein wie als Octave von c. — In der chromatischen Tonleiter kommt man durch 12 Quinten auf die 7te Octave des Grundtones; geht man aber 12 reine Quinten zu $^3/_2$ weiter, so entsteht das Intervall $(^3/_2)^{12}$ = ca. 130, welches nicht = 7 Octaven ist; denn durch 7 Octaven entsteht das Intervall $2^7 = 128$. Dieser Unterschied heißt das Pythagoräische Komma. Werden also auf einem Klavier die Quinten rein gestimmt, so werden die Octaven unrein und umgekehrt. — Nach der sogenannten Pythagoräischen Stimmung entsteht immer ein folgender Ton der dur-Tonleiter, wenn man von dem vorhergehenden Tone um 2 Quinten hinauf und dann 1 Octave herabgeht; dieses trifft zu für die Secunde, denn $1 \cdot {}^3/_2 \cdot {}^3/_2 = {}^9/_4 = 2 \cdot {}^9/_8$, aber nicht für die Terz, weil $^9/_8 \cdot {}^3/_2 \cdot {}^3/_2 : 2 = {}^{81}/_{64}$, aber nicht = $^5/_4$. Stimmt man also die Tonleiter nach Quinten und Octaven, so werden die anderen Intervalle unrein.

Sollten alle Intervalle aller Tonarten vollkommen rein sein, so müßten, wie diese Beispiele zeigen, in jeder Tonleiter viel mehr als 12 Töne vorkommen. Instrumente, welche alle diese Töne enthalten, geben die wohlklingendsten Accorde, wie z. B. eine von Helmholtz construirte Physharmonica, Appunns Harmonium mit natürlich reiner Stimmung, Pooles Orgel. Die reinen Accorde solcher Instrumente haben nach Helmholtz „einen sehr vollen und gleichsam gesättigten Wohlklang"; die Accorde gewöhnlicher Instrumente klingen daneben „rauh, trübe, zitternd und unruhig." Da indessen auf den meisten Instrumenten unmöglich mehr als 12 Töne in einer Octave angebracht werden können, so muß man doch bei der chromatischen Tonleiter bleiben und innerhalb derselben den einzelnen Tönen eine solche Höhe geben, daß die Fehler möglichst klein werden. Die Veränderung, welche an den 12 Tönen einer Octave vorgenommen werden muß, um die Intervalle möglichst rein zu erhalten, nennt man die Temperatur. Werden einzelne Intervalle vollkommen rein gemacht und die Fehler auf die übrigen vertheilt, so hat man die ungleichschwebende Temperatur. Eine solche ist Kirnbergers Temperatur, in welcher von den 12 Quinten 9 natürlich rein sind. In der heutigen Musik ist allgemein die gleichschwebende Temperatur eingeführt, bei welcher sämmtliche Octaven rein und die 12 Töne einer Octave ganz gleiche Intervalle mit einander bilden. Es sei dieses Intervall = x, so muß $x^{12} = 2$, also $x = \sqrt[12]{2} = 1{,}05946$ sein. Dieser halbe Ton der gleichschwebenden Temperatur ist kleiner als der große halbe Ton $^{16}/_{15} = 1{,}06666$ und größer wie der kleine halbe Ton $^{25}/_{24} = 1{,}04166$. Zwei dieser halben Töne geben die gleichschwebende Secunde $= \sqrt[12]{2^2} = 1{,}12246$, während die reine große Secunde $^9/_8 = 1{,}125$ beträgt. Die temperirte große Terz ist $\sqrt[12]{2^4} = 1{,}25992$, die reine $^5/_4 = 1{,}25$; die temperirte Quarte $= \sqrt[12]{2^5} = 1{,}33484$, die reine $= {}^4/_3 = 1{,}3333\ldots$; die temperirte Quinte ist $\sqrt[12]{2^7} = 1{,}49831$, die reine $^3/_2 = 1{,}5$; die temperirte Sexte und Septime sind 1,68179 und 1,88775, die reinen Intervalle sind 1,66666 und 1,875; aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß die temperirten Intervalle sich nur wenig von den reinen unterscheiden.

Wenn nun auch die gleichschwebende Temperatur den Vorzug hat, mit einer möglichst geringen Zahl von Tönen eine möglichst große Zahl von Tonarten von ziemlich gleichem Wohlklange darzubieten, so hat sie doch auch den Nachtheil, daß kein Accord gleichschwebend gestimmter Instrumente, wie z. B. der Klaviere, vollkommen rein ist; da nun die musikalische Bildung ihre Grundlage in dem Klavier hat, so werden auch von Sängern und Instrumentalisten meistens die gleichschwebenden Intervalle angegeben. Nur Streichquartett-

spieler, die sich vollkommen von den Schulregeln emancipirt und ein feines Gehör haben, sowie Quartettsänger, die viel ohne Klavier singen, finden wieder von selbst den Wohlklang der natürlich reinen Stimmung und erzielen damit die höchste Wirkung.

Jedoch haben neuere Versuche von Cornu und Mercadier (1869 u. 71) ergeben, daß sowohl gute, wie auch bedeutende Künstler nur in der Harmonie die natürlich reine Stimmung, in der Melodie dagegen die Pythagoräische Stimmung anwenden. Dieselbe wurde schon in 241. charakterisirt; wie dort gezeigt wurde, ist in dieser Stimmung die Terz $^{81}/_{64}$ vom Grundtone, also $^{9}/_{8}$ von der Secunde; ebenso ist durch weitere Verfolgung des Verfahrens leicht zu ersehen, daß in dieser Stimmung überhaupt nur große ganze Töne vorkommen, daß also die Sexte $^{27}/_{16}$ und die Septime $^{243}/_{128}$ vom Grundtone ist. Bei den ersten Versuchen wandten die beiden Forscher einen parabolischen Phonautograph an, durch welchen sie die Wellen der Intervalle aufzeichnen ließen; bei späteren Versuchen setzten sie dünne Messingplatten in die Instrumente ein, welche durch einen langen Stahldraht die Schwingungen auf ein Vibrograph übertrugen. Nach diesen Versuchen würden die ganzen Töne in der Melodie sich von denen in der Harmonie um das Komma unterscheiden. Dieser Unterschied ist durchaus nicht unmerklich, denn schon Aug. Seebeck hat gezeigt, daß geübte Ohren zwei Stimmgabeltöne von 1209 und 1210 Schwingungen, die sich nur um $^{1}/_{15}$ Komma unterscheiden, selbst nach einander in der Tonhöhe zu erkennen vermögen.

242 **Die Schwingungszahlen der musikalischen Töne.** Nach der Feststellung der Schwingungszahlenverhältnisse der Intervalle in den verschiedenen Temperaturen ist es leicht, die Schwingungszahlen der musikalischen Töne zu berechnen, so wie man nur einen Ton der ganzen Tonreihe kennt. Es ist gebräuchlich, a_1, den sogenannten Kammerton, hier ebenso wie beim Stimmen zu Grunde zu legen und die Höhe von a_1 durch Stimmgabeln zu bestimmen; doch stimmen die Schwingungszahlen der a_1-Stimmgabeln sehr häufig nicht überein; im Laufe der Zeiten sowohl hat sich die Höhe der Stimmung öfters verändert (z. B. in Glucks Opern sind dem Baß und dem Bariton häufig die eingestrichenen g und a vorgeschrieben), als auch an verschiedenen Orten zu ein und derselben Zeit sehr verschiedene Kammertöne an den Orchestern herrschten. In Frankreich wurde endlich (1859) festgestellt, daß der Kammerton a_1 bei den staatlichen Orchestern 435 Schwingungen betragen solle; 440 Schwingungen für a_1 waren schon von Scheibler auf der Naturforscherversammlung in Stuttgart 1834 vorgeschlagen und vielfach auch in die akustischen Instrumente eingeführt worden; doch besteht auch noch häufig in diesen eine Stimmung, in welcher c ganze Potenzen von 2 als Schwingungszahl besitzt, wo also $c_{-3} = 16$ und $c_1 = 256$. Wenn a_1 dagegen $= 440$, so hat das natürlich reine $c_1 = 440 : {}^5/_3 = 264$ und $c_{-3} = 264 : 2 : 2 : 2 : 2 = 16{,}5$ Schwingungen. Für $a_1 = 435$ ergibt sich $c_1 = 435 : {}^5/_3 = 261$, $c = 261 : 2 = 130{,}5$, $c_{-1} = 65{,}25$, $c_{-2} = 32{,}6$, $c_{-3} = 16{,}3$; ebenso $c_2 = 261 . 2 = 522$, $c_3 = 1044$, $c_4 = 2088$. Durch Multiplication mit den bekannten Verhältnißzahlen der natürlich reinen Intervalle erhält man leicht folgende Tabelle für die c-dur-Tonleiter nach der Pariser Stimmung.

Natürlich reine Stimmung.

Noten	Sub-Contra-Octave c_{-3}—h_{-3}	Contra-Octave c_{-2}—h_{-2}	Große Octave c_{-1}—h_{-1}	Kleine Octave c—h	Eingestrichene Octave c_1—h_1	Zweigestrichene Octave c_2—h_2	Dreigestrichene Octave c_3—h_3	Viergestrichene Octave c_4—h_4
c	16,31	32,62	65,25	130,5	261	522	1044	2088
d	18,35	36,7	73,4	146,8	293,6	587	1174	2349
e	20,4	40,78	81,56	163	326	652,5	1305	2610
f	21,7	43,5	87	174	348	696	1392	2784
g	24,4	48,9	97,9	195,7	391,5	783	1566	3132
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,6	61,2	122,5	245	489	979	1957	3915

Dividirt man 435 durch die Zahl der temperirten Sexte 1,68179, so erhält man für das temperirte $c_1 = 258{,}65$ Schwingungen; durch Multiplication mit den

oben angegebenen Zahlen der temperirten Intervalle erhält man folgende Tabelle für die c-dur-Tonleiter.

Temperirte Stimmung.

	−3	−2	−1	0	1	2	3	4
c	16,16	32,33	64,66	129,32	258,65	517,3	1034,6	2069,2
d	18,15	36,29	72,58	145,16	290,32	580,65	1161,2	2322,6
e	20,37	40,73	81,47	162,94	325,88	651,76	1303,5	2607
f	21,58	43,16	86,32	172,63	345,26	690,52	1381	2762
g	24,22	48,44	96,88	193,77	387,54	775,1	1550	3100
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,5	61	122,1	244,2	488,2	976,4	1953	3906

Kennt man die Schwingungszahl n eines Tones und die Fortpflanzungsgeschw. c des Schalles, so läßt sich nach der bekannten Formel (25) $l = c / n$ die Wellenlänge des Tones berechnen. Wird die Geschw. des Schalles in der Luft $= 333^m$ gesetzt, so sind die Längen der Tonwellen in der Luft $= 333 / n$ in Metern. Besonders einfach gestaltet sich diese Rechnung für die Potenzenstimmung, wenn man die Geschw. des Schalles $= 1024'$ Par. setzt, also $= 2^{10}$; denn hier ist die Schwingungszahl n von $c = 128 = 2^7$, also die Wellenlänge von $c = 2^{10} / 2^7 = 2^3 = 8'$. Ebenso ist für jedes andere c oder c_x die Wellenlänge $l_x = 2^{3-x}$; also für $c_1 = 4'$, für $c_2 = 2'$, für $c_3 = 1'$, für $c_4 = {}^1/_2{}'$, für $c_5 = {}^1/_4{}'$; dagegen für $c_{-1} = 2^4 = 16'$, für $c_{-2} = 32'$, für $c_{-3} = 64'$. In der Potenzenstimmung gelten überhaupt für den Grundton c_x folgende einfache Beziehungen: Schwingungszahl $n_x = 2^{x+7}$, Wellenlänge $l_x = 2^{3-x}$, Länge der offenen Pfeife 2^{2-x}, Länge der gedeckten Pfeife 2^{1-x}; die beiden letzteren Dimensionen werden in 250. und 251. verständlich werden. Lord Rayleigh berechnete (1877) die Schwingungsdimensionen des Pfeifentones $f_4 = 2730$ und fand, daß das Maximum der Schwingungsgeschw. $0{,}0014^{cm}$ und die Maximalamplitude etwa 8 Hundertmilliontel von 1^{cm} betrage.

243 Aufg. 375. Eine Sirene mit 12 Löchern macht per Min. 2200 Touren; welchen Ton gibt sie? Aufl.: Scheiblers $a_1 = 440$. — A. 376. Welches sind die Wellenlängen des tiefsten (nach Helmholtz 40) und des höchsten musikalischen Tones in der Luft? Aufl.: $8{,}325^m$ und $66{,}6^{mm}$. — A. 377. Welches ist die Wellenlänge des tiefsten Tones einer Baßstimme $c_{-1} = 64$? Aufl.: $5{,}2^m$. — A. 378. Wenn die Wellenlänge eines höchsten Zirpentones 10^{mm} betrüge, welches wäre dann die Schwz.? Aufl.: 33300. — A. 379. Wie groß ist die Schwingungszeit eines Bockkäfertones von 5^{mm} Wellenlänge? Aufl.: $^1/_{66600}$ Sec. — A. 380. Welches sind die harmonischen Obertöne des tiefsten musikalischen Tones? Aufl.: 80, 120, 160, 200, 240 .... Schw. — A. 381. Welches ist der 9te harm. O.-T. des tiefsten Baßtones? Aufl.: $e_2 = 640$ Schw. — A. 382. Welcher Oberton ist e_4? Aufl.: Der 39ste. — A. 383. Welcher O.-T. ist dies von dem höchsten Baßtone e_1? Aufl.: Der 7te. — A. 384. Welches sind der 6te, 8te und 9te O.-T. von e_1? Aufl.: d_4, fis_4, gis_4. — A. 385. Wie wirken dieselben auf einander? Antw.: Sie dissoniren scharf. — A. 386. Wie heißen die 11 ersten Obertöne von g? Antw.: g_1, d_2, g_2, h_2, d_3, f_3, g_3, a_3, h_3, cis_4, d_4. — A. 387. Wie heißen dieselben von a, es, d_1, as_2, b_3? — A. 388. Wie steht die natürlich reine kleine Septime $^9/_5$ zur großen Sext der natürlich reinen und der Pythagoräischen Stimmung? Aufl.: $^{27}/_{25}$ und $^{16}/_{15}$. — A. 389. Welches sind die Schwzn. der dur-Tonleiter von $c_1 = 256$? Aufl.: $d_1 = 288$, $e_1 = 320$, $f_1 = 341^1/_3$, $g_1 = 384$, $a_1 = 426^2/_3$, $h_1 = 480$. (Zu vergleichen mit den Tabellen in 242.) — A. 390. Die Zahlen der dur-Tonleiter von $a_1 = 435$ und $= 440$ Schw. zu vergleichen. — A. 391. Die Zahlen derselben Tonleiter für die temperirte Stimmung zu berechnen und mit den Resultaten von A. 390 für die natürliche Stimmung zu vergleichen. — A. 392. Wie viel Schw. hat die natürliche und wie viel die temperirte Secunde von $c_2 = 512$? Aufl.: 576 und 574,7. — A. 393. Welcher Unterschied besteht zwischen der reinen und der temperirten Quinte von $g_1 = 387{,}54$? Aufl.: 0,66 Schw. — A. 394. Tabellen für die musikalischen Töne (ähnlich 242.) in der natürlichen und in der temperirten Stimmung zu berechnen, mit Grundlegung von Scheiblers $a_1 = 440$ und der Potenzenstimmung $c_{-3} = 16$. — A 395. Wie viel Schw. vollbringen der große und der kleine ganze, sowie der große und der kleine halbe Ton von $d = 145{,}16$? Aufl.: 163,3, 161,3, 154,8, 151,2. — A. 396. Welcher Ton hat 60 mal so viel Schw. als c_{-2}, 20 mal so viel als d, 24 mal so viel als a_{-1}, 18 mal so viel als c_{-2}, 10 mal so viel als g_1? Antw.: h_3, fis_4, e_4, d_2, h_4. — A. 397. Um wie viel unterscheidet sich der 6te Oberton des $c_1 = 256$ von dem b_3? Aufl.: Um 8 Schw. — A. 398. Welche Töne haben 2, 3, 4, 5, 6 mal weniger Schw. als c_2? Antw.: c_1, f, c, as_{-1}, f_{-1}. — A. 399. Wie viel Schw. vollbringt cis_2 als reine Terz von a_1, als kleine

Secunde von c_2 und als des_2? Antw.: $543^3/_4$, $556^4/_5$, $550^5/_{16}$. — A. 400. Wie viel Schw. kämen dem as_1 zu als Erniedrigung von a_1 um $^1/_2$ Ton, als Erhöhung von g_1 um $^1/_2$ Ton, als große Terz von e_1, als kleine Terz von f_1, als kleine Sexte von c_1? Aufl.: $407^{13}/_{16}$, 417,6, 407,5, 417,6, 417,6. — A. 401. Wie viele temperirte Halbtöne liegen zwischen 300 und 500 Schw.? Aufl.: $300 \,.\, 1{,}05946^x = 500$; hieraus $x = 8{,}8$. — A. 402. Drei Octaven mit $3 \,.\, 12 = 36$ Halbtönen der chromatischen Tonleiter sind = 4 Sexten = 4 9 = 36; stimmt dies zu den natürlich reinen Intervallen? Aufl.: Nein; denn 3 Octaven $= 2^3 = 8$; 4 Sexten aber $= (^5/_3)^4 = 7^{58}/_{81}$. — A. 403. Wie viele reine Quarten liegen zwischen 500 und 3000 Schw.? Aufl.: $500 \,.\, (^4/_3)^x = 3000$; daher $x = 6{,}2$. — A. 404. Welcher Ton hat eine Wellenlänge von 1^{dm}? Aufl.: Nach Fl. (25) ist $1 = 3330 / x$, woraus $x = 3330$ Schw. = gis_1 ca. — A. 405. Für welchen Ton ist die Wellenlänge $= 1^m$? — Aufl.: Ein Ton zwischen e_1 und f_1.

2. Die Entstehung des Schalles.

244 **Eintheilung der Tonerreger.** Als Tonerreger werden solche elastische Körper benutzt, die sich leicht in Schwingungen versetzen lassen; da die flüssigen Körper durch eine Zugkraft zersplittern und durch gewöhnliche Druckkräfte nur eine sehr geringe Veränderung erfahren, so werden sie nicht als Tonerreger gebraucht, obwohl sie durch künstliche Vorrichtung ebenfalls zum Tönen gebracht werden können. Zur Erzeugung der Töne benutzt man daher nur luftförmige und feste Körper und zwar solche, bei denen eine oder zwei Dimensionen ganz klein sind, wie Luftsäulen, Stäbe, Drähte, Platten, weil dieselben sich leichter als Ganzes zum Schwingen bringen lassen. Die festen Tonerreger kann man nach dem Vorwalten von einer oder zwei Dimensionen in linienförmige und flächenförmige eintheilen; die linienförmigen zerfallen in biegsame oder Saiten und in starre oder Stäbe, ebenso die flächenförmigen in biegsame oder Membrane, und in starre oder Scheiben. Die Schwingungen derselben können sowohl transversal wie auch longitudinal, in manchen Fällen auch drehend sein. Transversale Schwingungen entstehen, wenn man die Tonerreger senkrecht zu ihren Hauptdimensionen zupft, streicht, schlägt oder stößt und sie dadurch aus ihrer Gleichgewichtslage bringt, wonach sie wieder in dieselbe zurückkehren und nach dem Gesetze der Trägheit über dieselbe hinausgehen. Longitudinale Schwingungen entstehen, wenn man die Tonerreger in ihrer Hauptrichtung reibt, streicht, stößt oder schlägt; die drehenden Schwingungen werden durch drehende Reibung hervorgebracht. Jede an irgend einer Stelle hervorgebrachte Schwingungsbewegung pflanzt sich durch den ganzen Tonerreger fort, wird an den Grenzen desselben reflectirt, und interferirt mit den ursprünglichen Schwingungen zu stehenden Wellen. *Die Töne bestehen demnach aus stehenden Wellen der Tonerreger.*

245 **Transversale Schwingungen der Saiten** (Mersenne 1630; Taylor 1713). Wenn Saiten schwingen sollen, so müssen sie gespannt sein; dies geschieht entweder durch Befestigung an dem einen Ende und durch Aufwinden mittels eines Wirbels an dem anderen Ende, oder durch Anhängen von Gewichten. In dem letzten Falle gibt die Größe des Gewichtes (nach Axiom 5) zugleich die Größe der Spannung an. Die wichtigste Frage bei Saitenschwingungen ist der Zusammenhang der Schwingungszeit oder der Schwingungszahl mit den Dimensionen und der Spannung der Saite; darüber besteht folgendes Gesetz: *Die Schwingungszahl einer Saite steht in umgekehrtem Verhältnisse mit der Länge und der Dicke, sowie mit der Wurzel aus dem specifischen Gewichte der Saite, dagegen in geradem Verhältnisse mit der Wurzel aus der Spannung.*

Beweis. Schwingt eine Saite von der Länge l als Ganzes, als eine einzige stehende Welle, so muß diese als die Folge einer fortschreitenden Welle von doppelter Länge $2l$ angesehen werden; folglich ergibt sich nach Fl. (28) für die Schwingungszeit T die Fl. T =

$2l\sqrt{(d/e)}$. Hierin bedeutet d die Dichte oder die Masse der Volumeneinheit, welche nach 19. bekanntlich $= s/g$, gleich dem sp. Gew. der Saite dividirt durch die Acceleration g. Die Elasticität der Saite wird durch ihre Spannung p ersetzt; da aber der Elasticitätsmodul e sich auf die Einheit des Querschnittes bezieht und die Elasticität nach 65. dem Querschnitte umgekehrt proportional ist, so ist statt e offenbar p/q zu setzen. Wenn man in der Formel für T die beiden Substitutionen für d und für e vornimmt, so ergibt sich $T = 2l\sqrt{(s/g):(p/q)} = 2l\sqrt{(qs/pg)}$. Bedenkt man sodann, daß die Schwingungszahl $n = 1/T$, so erhält man die Formeln:

$$T = 2l\sqrt{\frac{qs}{pg}} \text{ und } n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{pg}{qs}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (32).$$

In der letzten Fl. ist das Gesetz enthalten, da die Dicke der Wurzel aus dem Querschnitte proportional ist.

Nachweis. Am einfachsten geschieht der Nachweis durch das Monochord; dasselbe ist ein Kasten von trockenem Holze, auf den eine oder mehrere Saiten gespannt und durch verschiebbare Stege verlängert oder verkürzt werden können; an einer Skala unter der Saite kann man die Längen genau ablesen. Macht man durch Verschiebung des Steges die Saite 2, 3, 4, 5 .... mal kürzer, so erhält man die Octave, die Quinte der Octave, die Doppeloctave, die Terz der Doppeloctave u. s. w., kurz die harmonischen Obertöne, welche bekanntlich 2, 3, 4, 5 mal so viel Schw. haben als der Grundton. Macht man das an der Saite hängende Gewicht 4, 9, 16 ... mal so groß, so erhält man dieselben Obertöne. Zieht man eine Saite von 2 oder dreifacher Dicke von demselben Stoffe auf und hängt immer dasselbe Gewicht daran, so erhält man die tiefere Octave oder die Quarte der tieferen Doppeloctave. Vergleicht man eine Stahlsaite mit einer gleich dicken, gleich langen und gleich stark gespannten Darmsaite, so findet man, daß die erstere weniger Schw. vollbringt als die letztere, und daß der Unterschied der Wurzel aus dem spec. Gew. gemäß ist. Alle diese Verhältnisse benutzt man in der Musik. Bei der Violine (g, d_1, a_1, e_2), der Viola oder Bratsche (c, g, d_1, a_1), dem Violoncell (c_{-1}, g_{-1}, d, a), dem Contrabaß ($e_{-2}, a_{-2}, d_{-1}, g_{-1}$), der Guitarre ($e_{-1}, a_{-1}, d, g, h, e_1$), der Zither, der Harfe, der Laute, dem Hackbrett und dem Kavier werden die Saiten für die höheren Töne kurz, dünn und leicht, die für die tiefen lang und dick genommen und durch Ueberspinnen mit Stahldraht schwer gemacht; durch stärkeres Spannen werden die Töne erhöht. Die letzteren Instrumente haben für jeden Ton eine oder mehrere Saiten; bei den ersteren, die nur aus wenigen Saiten bestehen, werden die höheren Töne dadurch erzeugt, daß man durch Andrücken der Saite gegen das Griffbrett den schwingenden Theil derselben verkürzt. — Nachdem das Gesetz über die Saitenlängen festgestellt ist, kann man mittels desselben die Richtigkeit der Intervallzahlen zeigen; man macht auf dem Monochord durch Verschieben des Steges eine Saite $^9/_8$, $^5/_4$, $^4/_3$, $^3/_2$, $^5/_3$, $^{15}/_8$, 2 mal kürzer, so erhält man die Töne der diatonischen, natürlich reinen Tonleiter; ebenso kann man den kleinen ganzen Ton $^{10}/_9$, die halben Töne $^{16}/_{15}$ und $^{25}/_{24}$, die kleine Terz $^6/_5$ und die kleine Sexte $^8/_5$ und andere Intervalle hörbar machen; besonders empfiehlt es sich, die harmonischen Obertöne des Grundtones einer tief gestimmten Saite zu Gehör zu bringen, indem man dieselbe durch einen Steg 2, 3, 4 .... mal kürzer macht; man hört dann die erste Octave, die Quinte derselben, die zweite Octave, die Terz, Quinte und kleine Septime derselben, die dritte Octave, die Secunde, Terz .... derselben.

Die angegebene Formel gilt jedoch nur für absolut biegsame Saiten; da die wirklichen Saiten eine Steifigkeit besitzen, wodurch die Moleküle schon ohne besondere Saitenspannung einer gewissen Spannung unterliegen, so schwingen die wirklichen Saiten wie absolut biegsame von größerer Spannung; die theoretische Schwingungszahl n wird nach Seebeck (1847) durch diese Einflüsse übergeführt in die wirkliche $n' = n\,[1 + (r^2/l)\sqrt{(e\pi/p)}]$, worin r den Radius, e den Elasticitätsmodul und p die Spannung der Saite ohne Rücksicht auf die Steifigkeit bedeutet. Aus dieser Formel ergibt sich, wie aus obiger Ueberlegung, daß die Schwz. einer Saite durch ihre Steifigkeit erhöht wird, und zwar um so mehr, je dicker, je kürzer und je weniger gespannt dieselbe ist.

246 Eine Saite kann auch in 2, 3, 4 ... gleichen Theilen, also mit 1, 2, 3 .... Knoten schwingen. Dies findet statt, wenn man $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ ... derselben in Schwingungen versetzt; denn alsdann erregt man fortschreitende Wellen, deren Längen $^2/_2$, $^2/_3$, $^2/_4$ .... von der Saitenlänge sind, und diese fortschreitenden Wellen interferiren nach 227. mit den an den Saitengrenzen reflectirten Wellen zu stehenden Wellen von $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ ... der Saitenlänge, es entstehen also 2, 3, 4 .... stehende Wellen auf der Saite, von denen je zwei neben einander liegende in entgegengesetzten Phasen begriffen sind. Da diese Wellen 2, 3, 4 .... mal kürzer sind als die stehende Welle der ganzen Saite, so müssen sie auch 2, 3, 4 .... mal

so viel Schwingungen enthalten, also die Octave, die Octavenquinte, die Doppeloctave . . . ., kurz die harmonischen Obertöne ergeben.

Auch diese Erscheinungen sind leicht am Monochord nachzuweisen. Man setzt den Steg in $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ . . . . der Saite unter dieselbe und schlägt den einen Theil an, so hört man die harmonischen Obertöne; daß die anderen, nicht angeschlagenen Theile mitschwingen, zeigt man durch Reiter von Papier oder von leichtem Drahte. Hat man z. B. den Steg in $\frac{1}{5}$ der Saite untergesetzt, so bleiben die Reiter auf den Theilpunkten $\frac{2}{5}$, $\frac{3}{5}$, $\frac{4}{5}$ sitzen, springen aber von Stellen zwischen diesen Theilpunkten herab, wenn man das erste Fünftel anschlägt. Indessen ist es noch lehrreicher, den Steg wegzulassen, und den einen Theilpunkt nur leicht mit dem Finger oder mit einer Federfahne oder mit einem Pinsel zu berühren; die Obertöne erklingen dann viel weicher und metallischer, fast flötenartig, weßhalb man die so erregten Töne auch Flageolet-Töne nennt.

Sehr schön lassen sich diese Erscheinungen mit Meldes Stimmgabelapparat zeigen, der auch zum Nachweise des Hauptgesetzes und der Fl. (32) benutzt werden kann. Bekanntlich schwingt der Faden dieses Apparates (Fig. 140) nur dann als Ganzes, wenn er vermöge seiner Länge, Dicke, Spannung und Dichte gerade so viel Schw. macht, als die Gabel (oder halb soviel, wenn die Gabel in der Fadenrichtung schwingt). Kennt man nun die Schwz. der Gabel, sowie die Dicke, die Spannung und das Gewicht des Fadens, so kann man die Länge desselben nach Fl. (32) berechnen; gibt man dem Faden durch Verschieben des Schlittens diese Länge, so schwingt er als luftiges Gewebe auf und ab, während er bei unrichtiger Länge nur zittert. Hiermit ist die Fl. (32) und damit das Hauptgesetz nachgewiesen; doch kann man auch die vier Theile desselben einzeln nachweisen. Bei drei Gabeln, deren Schwzn. sich wie 1 : 2 : 3 verhalten, müssen die Fadenlängen in dem Verhältnisse 3 : 2 : 1 stehen. Macht eine Gabel doppelt so viel Schw. als eine andere, so muß man bei gleicher Fadenlänge an die letztere vier Fäden spannen, wie die erste nur einen trägt; hiermit ist der Einfluß der Wurzel aus dem Querschnitte gezeigt. Nimmt man aber an die langsamer schwingende Gabel nur einen Faden, so muß man an dem Faden der schnelleren Gabel 4mal so viel Gewichte hängen als an den der langsameren, wodurch das Verhältniß der Schwz. zu der Wurzel aus der Spannung zu Tage tritt. Hat man Drähte von verschiedenen Metallen an dieselbe Stimmgabel gespannt, so ergibt sich, daß bei gleicher Länge und Dicke die anzuhängenden Gewichte sich wie die sp. G. der Drähte verhalten. Man kann umgekehrt hieraus das sp. G. von Drähten und Fäden bestimmen. — Wenn man an einem Faden, der als Ganzes schwingt, die spannenden Gewichte 4, 9, 16 . . . . mal kleiner macht, so könnte derselbe nur als Ganzes schwingen, wenn er 2, 3, 4 . . . . mal kürzer gemacht würde, weil der Einfluß der Länge alsdann demjenigen der Wurzel aus der Spannung gleich, aber entgegengesetzt wäre; läßt man aber dem Faden seine Länge, so theilt er sich in 2, 3, 4 . . . . einzeln schwingende Theile mit 1, 2, 3 . . . . Knoten. Besonders prachtvoll sind diese Erscheinungen, wenn man statt des Fadens nach Young flachen, polirten Silberdraht nimmt und diesen mit elektrischem Lichte beleuchtet, oder wenn man wie Tyndall einen durch einen elektrischen Strom glühend gemachten Platindraht verwendet.

Es wird später evident werden, daß eine Saite (wie auch die meisten anderen Tonerreger) nie ausschließlich als Ganzes schwingt, sondern gleichzeitig auch in gleichen Theilen, daß also auch der Grundton nie allein auftritt, sondern nur in Mischung mit Obertönen, die allerdings ihrer Schwäche wegen für das gewöhnliche Ohr unmerklich sind. Nur bei der **Aeolsharfe** (beschr. v. Ath. Kircher 1650) erklingen auch die Obertöne so stark, daß dieselbe meist in allerdings leise gehauchten Accorden tönt. Sie besteht aus einem langen, schmalen Resonanzkasten, der mit einer Anzahl gleich gestimmter Saiten bezogen und dem Luftzuge ausgesetzt ist. Young beobachtete (1800), daß eine Saite der Aeolsharfe gleichzeitig mehrere deutlich hörbare Töne gibt; wenn alle tönen, mag die Zahl der stark klingenden Obertöne noch größer sein. Strouhal untersuchte (1878) die **Reibungstöne**, die durch sehr rasche Fortbewegung eines Drahtes senkrecht zu seiner Länge entstehen; es ergab sich, daß die Tonhöhe nur von der Geschw. und der Drahtdicke abhängt und zwar der ersteren direct, der letzteren umgekehrt proportional ist. Bei allmälig zunehmender Geschw. steigt demnach auch die Tonhöhe allmälig, woraus hervorgeht, daß die Reibungstöne mit den Eigentönen des Drahtes nichts gemein haben. Wenn jedoch der Reibungston bei allmäliger Steigerung der Tonhöhe den Grundton des Drahtes erreicht hat, so tritt derselbe stark und immer stärker hervor, vorausgesetzt, daß die Drehgeschw. jetzt dieselbe bleibt; wird sie gesteigert, so verschwindet der Grundton, jedoch treten bei fortschreitender Steigerung nach und nach der 1., 2., 3. . . . u. s. w. Oberton auf. Die Reibungstöne regen also die Eigentöne des Drahtes an und zwar auch dann in deutlicher Stärke, wenn sie selbst unmerklich schwach sind. Hiermit ist die Aeolsharfe erklärt. Trifft ein Wind die Saite einer Aeolsharfe an verschiedenen Stellen in ungleicher Stärke, so können verschiedene kaum hörbare Reibungstöne entstehen; diejenigen, welche mit dem Grundton und den Obertönen der Saite stimmen,

erregen dieselben gleichzeitig in der Saite zu stärkerem Tönen. Hierdurch erklärt sich auch die bekannte Launenhaftigkeit der Aeolsharfe; wenn die kaum hörbaren Reibungstöne nicht mit ihren Eigentönen stimmen, so bleibt sie stumm. Auch die Beobachtungen von Lord Rayleigh (1879), der durch den Zug einer starken Feuersgluth eine Aeolsharfe erregte, aber durch das Oeffnen einer Thüre oder das Zulegen eine Papierschnitzels auf die Gluth die Töne verschwinden hörte, sind hiermit erklärt. Nach Rayleigh geschehen die Schw. der Aeolsharfensaiten nicht in der Richtung des Windes, sondern senkrecht zu derselben.

Das Monochord heißt auch **Sonometer**, weil mit ihm und der Taylor'schen Formel (32) die Schwz. eines Tones gefunden werden kann; denn der Nenner qs ist das Gewicht der Längeneinheit der Saite, läßt sich also leicht mit der Wage bestimmen, ebenso wie die Spannung p. Rückt man daher den Steg an eine solche Stelle der Saite, daß diese den zu bestimmenden Ton ergibt, so ist die Länge l leicht abzulesen und durch Einsetzen der Daten in Fl. (32) ist die Schz. einfach zu berechnen. Da Taylors Fl. auch für **Meldes Faden** gilt und dessen Schwz. mit der Schwz. der Stimmgabel übereinstimmt, an welcher der Faden befestigt ist, so kann auf dieselbe Weise die Schwz. der Gabel oder eines anderen Stabes bestimmt werden (Carl Müller von Eppstein 1875).

Transversale Schwingungen der Stäbe. (Euler 1779; Chladni 1796). **247** Stäbe schwingen, ohne gespannt oder belastet zu sein, durch ihre Elasticität; sie bedürfen nur einer festen Lage. Die Schwingungen geschehen nach folgendem Gesetze: **die Schwingungszahl eines Stabes** ist unabhängig von seiner Breite, aber **direct proportional der Dicke** und der Wurzel aus dem Elasticitätsmodul, und umgekehrt proportional dem **Quadrat der Länge** und der Wurzel aus dem specifischen Gewichte.

Beweis. Die Länge, Breite und Dicke seien bezüglich mit l, b und h, der Elasticitätsmodul mit e und die den Stab biegende Kraft mit p bezeichnet, so ist nach 67. die Größe der Biegung pl^3/ebh^3; ist diese Biegung $= 1$, so ergibt sich die hierzu nöthige Kraft $p = ebh^3/l^3$. Diese Kraft wirkt auf die ganze Masse $m = bhls/g$ des Stabes; daher ist unsere auf die Einheit der Masse wirkende Kraft $k = (ebh^3/l^3) : (bhls/g) = geh^2/l^4s$. Setzt man diesen Werth in Fl. (26) für die Schwingungszeit $T = 2\pi/\sqrt{k}$ ein und suchen wir hieraus nach der Formel $n = 1/T$ die Schwingungszahl n, so erhält man

$$T = C \cdot \frac{l^2}{h}\sqrt{\frac{s}{eg}} \text{ und } n = A \cdot \frac{h}{l^2}\sqrt{\frac{eg}{s}} \quad \ldots\ldots\ldots (33)$$

In diesen Formeln, mit welchen das Gesetz über die Schw. der Stäbe bewiesen ist, bedeuten C und A zwei constante Größen, in denen die Größe 2π steckt, und die nach der Befestigungsweise der Stäbe einen verschiedenen Werth haben. So ist für einen cylindrischen Stab, der an einem Ende festgeklemmt ist, $A = 0{,}28$; wenn er an beiden Enden fest geklemmt oder an beiden Enden frei ist, $A = 1{,}78$; wenn das eine Ende aufgelegt ist, $A = 1{,}23$; wenn beide Enden aufgelegt sind, $A = 0{,}785$. Hieraus geht hervor, daß ein und derselbe Stab bei verschiedener Befestigungsart sehr verschiedene Schwzn., also auch verschiedene Töne erzeugt; bei der zweiten Befestigungsart ist der Ton nahezu die dritte Octave des Tones für die erste Befestigungsart, bei der dritten Art nahezu die Quinte der Doppeloctave, bei der vierten die Quarte der Octave.

Da die Schwzn. hier mit den Quadraten der Länge und nicht mit der Länge selbst in umgekehrtem Verhältnisse stehen, so nimmt die Tonhöhe der Stäbe rasch zu, wenn die Länge derselben nur wenig abnimmt. Instrumente wie z. B. die Spieldose, die Strohfiedel, der Schellenbaum, deren Töne durch Stäbe erzeugt werden, bedürfen demnach nur geringer Längenunterschiede im Verhältnisse zu den Saiteninstrumenten. — Die Stäbe schwingen ebenfalls nicht nur als Ganzes, sondern auch in einzelnen durch Knoten getrennten Theilen, die aber nicht einander gleich sind. Nur in dem Falle, daß ein Stab an beiden Enden angestemmt ist, sind die Theile einander gleich; daher verhalten sich die Schwzn. eines solchen Stabes, wenn er mit 0, 1, 2, 3 .... Knoten schwingt, wie 1 : 4 : 9 : 16 .... — Für die erste Befestigungsart dagegen ist das Endglied des frei mit Knoten schwingenden Stabes kleiner als die Innenglieder, und auch diese sind nicht genau einander gleich: die Schwzn. eines mit 0, 1, 2, 3, 4 .... Knoten schwingenden Stabes verhalten sich dann annähernd wie 1 : 9 : 25 : 49 : 81. Die Schwingungsformen eines solchen Stabes sind sehr mannichfaltig und lassen sich leicht an Wheatstones Kaleidophon (1827) beobachten, in welchem der schwingende Stab eine versilberte Glaskugel trägt, auf die man ein helles Licht fallen läßt. — Mit einem solchen frei schwingenden Stabe z. B. einer Stricknadel läßt sich das Gesetz der Längen durch das Auge beobachten; macht z. B. der Stab bei einer gewissen Länge 1 Schw. in 1 Sec., so vollzieht er 4, 9, 16 Schw., wenn man ihn 2, 3, 4 mal kürzer macht; läßt man ihn noch kürzer schwingen, so kann man (nach Chladnis Vorgang 1787) leicht die Schwzn. der entstehenden Töne berechnen. Die einerseits freien Stäbe finden Verwendung

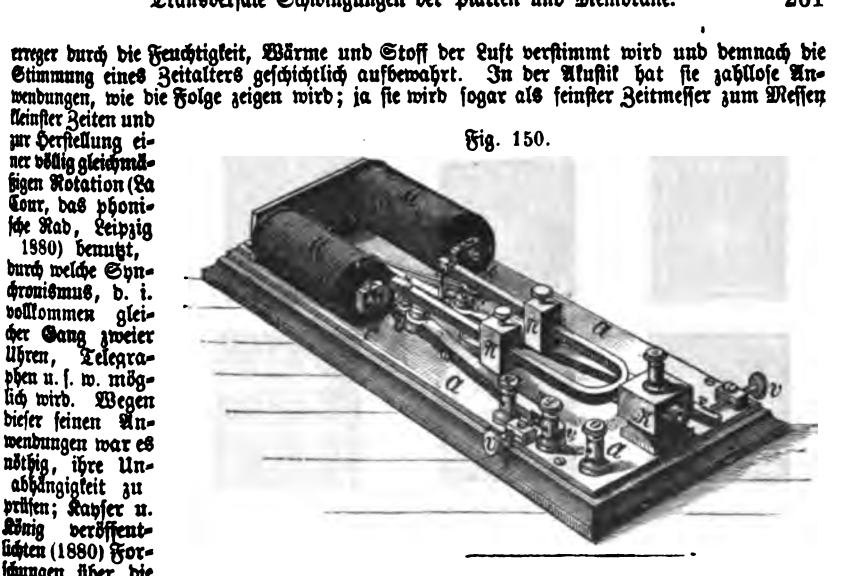
in der Zungenpfeife, in der Eisenvioline, der Spieldose und Drehorgel. — Ist der Stab an beiden Enden frei oder fest, so schwingt er mit 2, 3, 4 .... Knoten, und die Schwingungszahlen verhalten sich wie 9 : 25 : 49 ..., ergeben also unharmonische Töne; im ersten Falle liegen die zwei Knoten etwas weniger als 1/4 der Stablänge von den Enden entfernt. In der Strohfiedel, dem Holzinstrument, der Glasstabharmonika und dem Metallophon werden daher die Holz-, Glas- oder Metallstäbe an diesen Punkten auf Strohbündel gelegt, auf Schnüre gefaßt oder mit einer anderen weichen Unterlage versehen. Die Knoten solcher Stäbe lassen sich sichtbar machen, wenn man feinen Sand auf die Stäbe streut; derselbe rollt von den heftig bewegten Bäuchen nach den Knoten hin und bleibt dort ruhig liegen. — Den Einfluß des Materials auf die Tonhöhe prüfte Decharme (1876) an frei aufgehängten und durch Anschlagen zum Tönen gebrachten Metall-, Holz- und Steinstäben. Blei gab den tiefsten Ton f_3, die folgenden Metalle immer höhere Töne: Gold, Silber, Antimon, Zinn, Messing, Bronze, Zink, Kupfer, Gußeisen, Schmiedeeisen, Stahl, Aluminium, welch letzteres Metall den 2 Octaven höheren Ton f_5 ergab. Die Töne von 40 Holzarten lagen zwischen e_4 und e_5, Buchsbaum brachte den tiefsten, eine nordische Tanne den höchsten Ton hervor. Das Gesetz der Dichte und der Elasticität wurde durch diese Versuche im Allgemeinen bestätigt. — Nachdem Carl Müller (1875) nach der Methode mit Meldes Faden (1875) die Schwz. von porösen, mit Flüssigkeiten imprägnirten Stäben untersucht und eine Erniedrigung des Grundtones und der Obertöne festgestellt hatte, folgte (1882) Auerbach in der Vergleichung der Schwzn. gefüllter Hohlcylinder mit denen der leeren Gefäße; auch hier ergab sich eine, oft bedeutende, Erniedrigung des Tones, die bei verschiedenen Flüssigkeiten verschieden ist, mit zunehmender Dichte wächst und mit steigender Compressibilität abnimmt.

Die Stimmgabel, einer der wichtigsten akustischen und musikalischen Hilfsapparate, ist ein Stabinstrument. Ein gerader, an beiden Enden freier Stab hat seine 2 Knoten in 1/4 der Stablänge; wird jedoch der Stab gebogen, so rücken die Knoten näher aneinander, und gelangen nahe an die Kniestellen, wenn die Biegung bis zur Gabelform fortgesetzt ist. Die beiden Zinken einer Stimmgabel schwingen daher gleichzeitig nach innen, wenn die Biegung nach außen schwingt, und umgekehrt; weil die halben Außenwellen durch die Verlegung der Knoten verlängert werden, so gibt dieser Stab trotz seiner geringen Länge einen wenig hohen Ton; die gewöhnlichen zum Stimmen gebrauchten Gabeln mit ihren Zinken von noch nicht 1^dm Länge erzeugen meist den Ton a_1. Doch hat man auch Gabeln für tiefere Töne, deren Zinken nach dem Stabgesetze länger und dünner sein müssen, aber in der großen Octave kaum hörbare Töne bilden; für höhere Töne sind die Gabeln kleiner und so dick, als es die Tonerregung zuläßt. Appunns Gabel für e_8, die kleinste und höchst tönende von allen bestehenden, ist 13^mm lang, 14^mm breit und 3^mm dick. Die Stimmgabeln schwingen jedoch auch in mehr als 2 Knoten; der tiefste der hierdurch entstehenden Töne hat 5—6 mal soviel Schw. als der Grundton; die Schwzn. der höheren Töne verhalten sich zu diesem wie 9 : 25 : 49 ..., so daß die Höhe der Obertöne schnell wächst.

Beim Anschlagen der Gabel klingen diese Obertöne stark mit und geben dem Ton seinen klimpernden Klang. Der kurze Ton der Gabel wird verlängert durch Aufsetzen des Stieles auf eine Holzplatte, da hierdurch Resonanz eintritt, indem der longitudinal schwingende Stiel seine Schw. der Holzplatte als transversale mittheilt. Noch länger dauert der Ton, wenn die Gabel auf einen Resonanzkasten befestigt ist und angestrichen wird (Diapason); werden zwei solcher Kasten mit genau gleich gestimmten Gabeln an ihren offenen Seiten gegen einander gewendet, so dauert der Ton noch länger; ausdauernd wird er durch Anwendung eines Elektromagnets, wobei die Verstärkung durch eine nahe Resonanzröhre bewirkt wird; da jedoch durch solche Resonanzen nur der Grundton verstärkt wird, so verklingen die Obertöne rasch und es entsteht der reine Grundton. Fig. 150 stellt eine Einrichtung dar, mittels welcher die magnetisirte Stimmgabel ns durch den Elektromagnet MM in andauerndes Tönen versetzt wird. Der elektrische Strom tritt bei *l* in den Apparat, umkreist das Hufeisen, geht später durch den Platinstift c auf den Nordpol n der Stimmgabel und durch diese an die Klemmschraube bei K. Hierdurch erhält das Hufeisen die 2 Pole N und S, welche die Pole s und n der Stimmgabel anziehen. In Folge dessen berührt der Nordpol n der Gabel den Stift c nicht mehr, der Strom ist geöffnet und die Gabelzinken kehren durch ihre Elasticität zurück. So entstehen durch magnetische Anziehung und Elasticität Schw. der Gabel, die erst mit der Beseitigung des Stromes endigen. — In der Musik dient die Gabel zum Stimmen, da sie nicht wie die meisten andern Ton-

erreger durch die Feuchtigkeit, Wärme und Stoff der Luft verstimmt wird und demnach die Stimmung eines Zeitalters geschichtlich aufbewahrt. In der Akustik hat sie zahllose Anwendungen, wie die Folge zeigen wird; ja sie wird sogar als feinster Zeitmesser zum Messen kleinster Zeiten und zur Herstellung einer völlig gleichmäßigen Rotation (La Cour, das phonische Rad, Leipzig 1880) benutzt, durch welche Synchronismus, d. i. vollkommen gleicher Gang zweier Uhren, Telegraphen u. s. w. möglich wird. Wegen dieser feinen Anwendungen war es nöthig, ihre Unabhängigkeit zu prüfen; Kayser u. König veröffentlichten (1880) Forschungen über die Veränderung der Stimmung durch die Temperatur; ersterer fand, daß bei den Temperaturschwankungen, die in einem Zimmer vorkommen, die Schwz. erst in der 2. Decimalstelle beeinflußt wird; letzterer, daß die Tonhöhe einer Gabel von 128 Schw. durch 1° um 0,0143 verringert wird, daß die Veränderungen überhaupt innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler liegen.

Fig. 150.



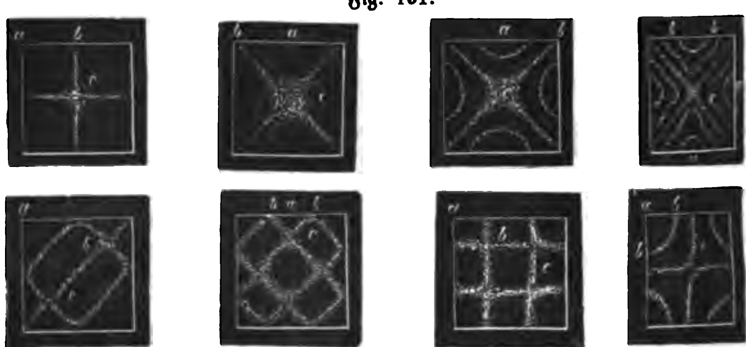
Transversale Schwingungen der Platten und Membrane, Chladnis Klangfiguren (1787). Platten werden in Schwingungen versetzt, indem man sie an einem Punkte festklemmt und am Rande mit einem Violinbogen anstreicht. Sie schwingen aber dann nicht als Ganzes, sondern in einzelnen Theilen, die durch ruhende Stellen, Knotenlinien genannt, von einander getrennt sind und sich in entgegengesetzten Phasen befinden. Da die Platten als Verbindungen von Stäben anzusehen sind, so ergibt sich für dieselben das Gesetz: die Schwingungszahl ist direct proportional der Dicke und der Quadratwurzel aus dem Elasticitätsmodul, dagegen umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus dem specifischen Gewichte und dem Quadrat des Durchmessers der Platte; außerdem wird dieselbe um so größer, in je mehr Theilen die Platte schwingt, je mehr Knotenlinien also vorhanden sind. 248

Die Zahl der Knotenlinien richtet sich nach der Art der Festklemmung und nach dem Verhältnisse der festgeklemmten Punkte zu der angestrichenen Stelle. Da dieses Verhältniß in vielfacher Weise verändert werden kann, so ist auch eine Platte zu zahlreichen verschiedenen Schwingungszahlen, also zu vielen Tönen befähigt. Von diesen Tönen erklingen beim Anstreichen oder beim Schlagen immer alle, für welche die angestrichene Stelle kein Knotenpunkt ist; ein Ton erklingt stark, der Grundton, die anderen schwächer, Nebentöne. Die Nebentöne, wie überhaupt die Töne einer Platte, sind meist unharmonisch zu einander.

Der letzte Theil des Gesetzes ist durch Chladnis Klangfiguren nachzuweisen. Auf eine festgeklemmte Glas-, Metall- oder Holzplatte von z. B. quadratischer oder Kreisform wird feiner, trockener Sand gestreut und die Platte dann gestrichen, während man irgend eine Stelle der Platte mit dem Finger berührt. Von den Bäuchen wird dann der Sand aufwärts geschleudert, rollt auf den unmerklichen schiefen Ebenen derselben an die Knotenlinien herab und häuft sich dort zu scharfen Streifen an, welche mit einander die von Chladni entdeckten Klangfiguren bilden. In den folgenden Figuren (151) ist immer die Berührungsstelle mit b, die Anstreichestelle mit a und die Einklemmstelle mit c bezeichnet. Nach Strehlke

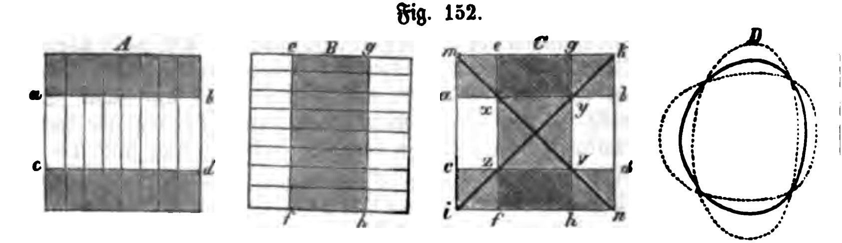
bestehen alle Klangfiguren aus krummen Linien, hauptsächlich Hyperbeln; ein und derselbe Ton kann je nach der Einklemmung verschiedene Figuren erzeugen, verschiedene Töne haben aber nie gleiche, sondern um so verwickeltere Figuren, je höher sie sind.

Fig. 151.



Zur Erklärung der Klangfiguren nach Wheatstone (1833) hat man sich die z. B. quadratische Platte A (Fig. 152) aus vielen parallelen Stäben zusammengesetzt zu denken, deren Enden frei sind; solche Stäbe aber schwingen mit Knoten in einem Abstande von ihrem Ende, etwa gleich $^1/_4$ ihrer Länge; alle diese Knoten bilden zusammen zwei Knotenlinien ab und cd, welche Bewegungen von entgegengesetzten Phasen von einander trennen. Dieselbe Platte kann man sich aber auch aus frei schwingenden Stäben von einer Richtung bestehend denken, die zu der eben betrachteten senkrecht steht, also wie in B; hierdurch erhält

Fig. 152.



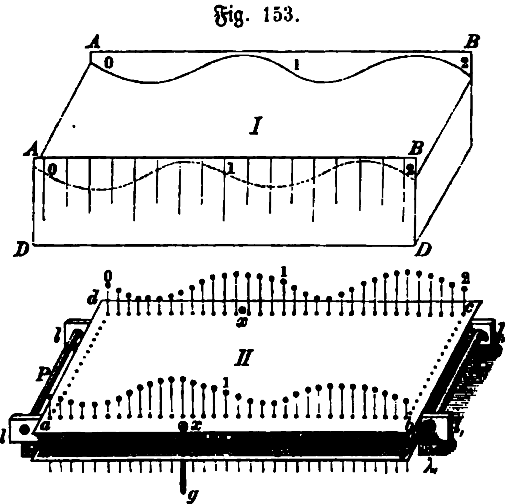
die Platte die Knotenlinien ef und gh, zu deren beiden Seiten wieder entgegengesetzte Bewegungen stattfinden, die mit denen der Platte A in gleicher oder entgegengesetzter Phase begriffen sind, wie in der Fig. durch gleiche Schraffirung angedeutet wurde. Eine gewisse Platte muß nun sowohl in der Weise A, wie auch in der Weise B schwingen, weil für eine ausschließliche Bewegung der einen Art kein Grund vorhanden ist. Man hat sich also in einer Platte zwei (in anderen Fällen sogar vier) Töne von gleicher Höhe gleichzeitig existirend vorzustellen (Coëxistenz gleicher Schw.). Demnach finden sich in einer tönenden Platte auch alle 4 Knotenlinien ab, cd, ef, gh. Wo diese Knotenlinien zusammentreffen, Fig. C in den Punkten x, y, v und z sind jedenfalls Ruhepunkte; in den Räumen aczx, bdvy, egyx, fhzv, wo gleiche Phasen auf einander treffen, kann sich keine Knotenlinie befinden; dagegen in den Räumen axem, bygk, dvhn, czfi, sowie in xyvz können ruhende Stellen vorkommen, weil hier entgegengesetzte Phasen auf einander treffen; und diese ruhenden Stellen müssen durch die Ruhepunkte x, y, v, z gehen, weil diese schon an sich in Ruhe sind; also müssen die Diagonalen mn und ik Knotenlinien sein. Diese Erklärungsweise der Klangfiguren, die Wheatstone auf viele Fälle ausgedehnt hat, ist zwar manchmal angefochten worden, hat aber durch neue Versuche von König in Paris (1862) ihre Bestätigung gefunden.

Besonders deutlich wird die auf der Superposition der Schwingungen beruhende Erklärung Wheatstones durch Meldes Wellenapparat (1874) (Fig. 153). Derselbe besteht aus den Theilen I und II; I ist ein Holzgestell, das oben eine aus Zinkblech gebildete Wellenfläche trägt, die etwas mehr als 2 Wellenlängen enthält und von der Vorder- und Hinterwand überragt wird; II enthält eine ganz gleiche Wellenfläche, jedoch gebildet aus den Knöpfen von 17.33 Strickstöcken, die ebenso die ganze Wellenfläche erfüllen, wie es in der Fig. II nur in der vorderen und hinteren Reihe angedeutet ist. Setzt man mittels der

Handhaben P und der Stifte xg den Theil II auf I unter 90° Drehung, so kann man durch die hervorragenden Stäbe die einfacheren Klangfiguren wahrnehmen. Auch die Interferenzgesetze von 226. lassen sich mittels dieses Apparates demonstriren.

Mischt man unter den Sand Bärlappsamen (semen lycopodii), so bilden sich an den heftigst bewegten Stellen einer Platte wirbelnde Staubwölkchen, Savarts Staubfiguren (1829); diese entstehen dadurch, daß an jenen Stellen die Luft fortgestoßen wird, daß also luftleere Räume entstehen, nach denen von den Knotenlinien her die Luft strömt und die leichten Staubtheilchen mitführt (Faraday 1831).

Fig. 153.



Die Glocken, welche als gekrümmte Platten anzusehen sind, schwingen ebenfalls nie als Ganzes, sondern, wenn sie ihren Grundton angeben, in vier gleichen Theilen, die durch Knotenlinien getrennt sind (Fig. 153 D). Diese ziehen von 4 diametralen Stellen des Randes nach dem Scheitel hin und können durch 4 diametral einander gegenüberhängende, die Glocke berührende Kügelchen sichtbar gemacht werden; von den Bäuchen springen dieselben lebhaft ab, an den Knoten fitzen sie ruhiger. Gießt man in eine Glasglocke Wasser und streicht den Rand mit einem Violinbogen, so geräth das Wasser in den Bäuchen in eine wirbelnde Bewegung, die sich nach den Knoten zu beruhigt; nimmt man statt Wasser Aether oder Alkohol, so reißen sich kugelige Tröpfchen los, die sich zu einem zierlichen Sterne gruppiren, dessen Strahlen nach den Knoten gerichtet sind. Glocken können auch in 6, 8, 10, 12 Theilen schwingen und bilden dann Töne, die zu dem Grundtone nahezu in dem Verhältnisse 4 : 9 : 16 : 25 : 36 stehen. Der Grundton einer Glocke ist um so höher, je kleiner ihre Oberfläche und je größer ihre Dicke ist. Außer zum Läuten und Zeitanschlagen werden die Glocken musikalisch im Glockenspiele, im Schellenbaume und in der Glasharmonika (erfunden von Franklin 1763) verwendet; diese besteht aus einer Anzahl von Glasglocken, welche auf einer gemeinschaftlichen Welle sitzend sich mit dieser drehen und durch einen Druck mit dem benetzten Finger reine, weiche Töne erzeugen. — Die ebenen Platten haben eine solche Verwendung nur in dem Becken, sowie in dem King der Chinesen und in dem Gambang der Javaner, welche Instrumente aus 16 Stein-, Metall- und Holzplatten bestehen.

Die Membrane schwingen meist als Ganzes; aller auf ein Paukenfell gestreute Sand wird beim Anschlagen desselben an den Rand geschleudert; doch können sie auch wie die Platten in Theilen schwingen, geben aber hierdurch meist unharmonische Nebentöne. Der Ton einer Membran ist um so höher, je stärker sie gespannt und je dicker sie ist. Die zwei Pauken der Orchester werden von f_{-1} bis b_{-1} und von c bis f gestimmt, so daß ihre Töne immer um eine Quinte von einander abstehen. Das Stimmen geschieht durch stärkeres Spannen mittels der Randschrauben; denn schon Chladni (1802) gab an, daß die Schwz. von saitenartig aufgespannten Membranen im geraden Verhältnisse zur Quadratwurzel aus der Spannung und im umgekehrten Verhältnisse zur Länge und zur Wurzel aus der Breite und Dicke steht. Das Gesetz der Spannung wurde von Poisson (1829) für allseitig gleichmäßig gespannte Membrane analytisch aufgefunden und von Bourget und Bernard (1860) bestätigt, dann von Melde (1876) für flüssige Lamellen und von Carl Müller (1877) für einseitig frei schwingende Membrane. Verwickelter sind die Gesetze der Dimensionen und Gestalten für die letzten Fälle; so fand z. B. Melde, daß die Schwzn. gleichflächiger flüssiger Membrane mit regulär vieleckiger Umgrenzung desto kleiner sind, je mehr sich der Umfang einem Minimum, dem Kreise nähert. Chladni entdeckte auch schon die Resonanzfiguren, die Savart (1824) für Membrane von Papier, Pergament, Goldschlägerhaut ausführlich darstellte, indem er solche mit feinem Sande bestreute und in ihrer Nähe Töne erregte; es ergab sich, daß die Membrane sehr vielfach in einzelnen Theilen schwingen können, daß bei höheren Tönen die Membran in mehr Theilen schwinge, und daß

eine Resonanzfigur beim allmäligen Steigern der Tonhöhe in eine andere allmälig übergehe. Weil die Stimmbänder einseitig frei schwingende Membrane sind, stellte C. Müller Untersuchungen an über solche dreieckige, quadratische und halbkreisförmige Membrane aus Pergamentpapier, die er mit sehr feinem, geschlämmtem und gefärbtem Quarzsande bestreute; er wandte jedoch nicht ausschließlich die von Weber kritisirte Resonanzmethode Savarts an, sondern versetzte die Membrane auch in eigenes Tönen durch Reiben eines Glasfadens, der an einem Korkstückchen befestigt und mit diesem auf die Membran durch Wachs aufgeklebt war, sowie endlich durch Anblasen der Membran mittels eines directen Luftstromes. Er fand, daß auf alle drei Arten demselben Tone dieselbe Klangfigur entspreche, daß also die Bedenken Webers gegen Savart des Letzteren Resultate nicht beeinflussen, daß jedoch die Figuren hier nicht continuirlich ineinander übergehen, sondern scharf und deutlich geschieden sind. Im Allgemeinen stieg die Schwz. mit der Zahl der Figuren, so daß kleineren Dimensionen höhere Töne entsprechen; jedoch sind weder einfach auszusprechende Gesetze aufzufinden, noch sind die höheren Töne mit harmonischen Obertönen zu vergleichen; nur die Aehnlichkeit mit den Obertönen ist hervorzuheben, daß die Intervalle der Membranpartialtöne bei zunehmender Höhe immer kleiner werden. Die Forschungen Meldes über *freischwebende flüssige Membrane* sind in den letzten Jahren fortgesetzt worden; Melde hat schon gefunden, daß die Partialschw. wie bei festen Membranen unharmonischen Obertönen entsprechen, die jedoch den theoretischen und praktischen Forschungen von Bourget für feste Membrane gemäß sind; er hatte seine Lamellen durch Eintauchen von Netzen in Glycerinseifelösung erhalten wie Plateau. Tyler (1877) tauchte Lampencylinder in mit Gelatine versetzte Seifenlösung und sah, wie auf dem Seifenhäutchen die Schwingungsformen der Töne eines Gesangstückes in voller Symmetrie sich viel deutlicher abspiegelten als in den Staublinien einer Kautschukmembran. Taylor (1878) stellte die Häutchen an den Oeffnungen von Helmholtz'schen Resonatoren her und strich in der Nähe eine gleichgestimmte Stimmgabel an; es bildeten sich dann für jeden Ton bestimmte farbige, geradlinige oder gekrümmte Resonanzfiguren, die symmetrisch angeordnet und von einem oder mehreren in entgegengesetzter Richtung rotirenden Farbenwirbeln begleitet sind (*Phoneidoskop*); aber nicht blos verschieden hohe Töne gaben verschiedene Tonbilder, sondern auch gleich hohe Töne von verschiedenem Klange, ja sogar verschiedene Vokale. Die phoneidoskopischen Darstellungen auf Seifenhäutchen können auch mittels Metallringen in der Nähe des Resonators geschehen, nach Gordon selbst zwischen Daumen und Zeigefinger.

Die *Schwingungen flüssiger Platten*, die auf einer festen Platte ausgebreitet sind, wurden schon früher erforscht. Faraday fand 1831, daß eine solche flüssige, schwingende Platte sich in Rippungen theile, deren Breite bei abnehmender Schwz. abnehme, aber mit der Dicke der flüssigen Schicht zunehme. Schneebeli (1871) hat die Versuche in anderer Weise wiederholt und dabei die interessante Thatsache gefunden, daß die Breite der Rippungen von der Natur der Flüssigkeit abhänge. In der Reihe Schwefelkohlenstoff, Alkohol, Terpentinöl, Schwefelsäure, Ameisensäure, Wasser, Nelkenöl, Glycerin wird die Rippenbreite immer größer, was deßhalb eine besondere Aufmerksamkeit verdient, weil auch die Capillaritätsconstante (171.) in derselben Weise zunimmt. Berthelemy (1874) hat nicht dünne Platten, sondern dicke, in verschieden geformte Gefäße gegossene Massen in Schw. versetzt, indem er auf das Gefäß eine schwere tönende Stimmgabel setzte; auch hier zeigten sich die Faltungen auf der Oberfläche der Flüssigkeiten, und nahm deren Entfernung von einander mit abnehmender Schwz. zu, aber, wie bei den dünnen Platten, blieb sie unabhängig von der Natur oder der Dichte der Flüssigkeit.

Die *Schwingungen der Luftplatten* wurden von Kundt (1869 und 73) erforscht; auf den Rand einer Glasplatte wurden entweder kleine Korkstückchen oder ein ganzer Korkrahmen und hierauf eine zweite Glasplatte gelegt; in ersterem Falle bildete sich zwischen den Glasplatten eine offene, in letzterem eine geschlossene Luftplatte; dieselben wurden in Schw. versetzt mittels einer Glasröhre, die auf einer Oeffnung der oberen Platte befestigt und oben mit einem Kork verschlossen war; dieser Kork umfaßte eine zweite, engere Glasröhre, die sich halb inner- halb außerhalb der weiteren Röhre befand und an ihrem inneren Ende einen die weite Röhre nur leicht berührenden Korkkolben trug. Wurde der äußere Theil dieser Röhre gerieben, so pflanzten sich die entstehenden longitudinalen Schw. derselben durch den Korkkolben auf die Luft in der weiten Röhre und auf die Luftplatte fort. Die engere Glasröhre wurde auf einen der Töne der Luftplatte abgestimmt, indem man an ihrem oberen Ende so lange kleine Stückchen abbrach, bis die gleiche Stimmung erzielt war. Dies wurde dadurch erkannt, daß feines Korkfeilicht, welches man vorher auf die untere Glasplatte ausgebreitet hatte, sich in *Klangfiguren* ordnete. Eine der zahlreichen Staubfig., welche Kundt erhielt, ist in Fig. 154 abgebildet; dieselben unterscheiden sich wesentlich von Chladnis Klangfig.; an den dunkeln Stellen bleibt nämlich der Staub in Ruhe liegen, sie sind Knoten und zwar Knotenpunkte, nicht Knotenlinien; die hellen Stellen dagegen bedeuten

Rippungen, welche der Staub durch seine Bewegungen bildet, die auf den Richtungen der Rippungen senkrecht stehen; diese Stellen sind Bäuche. Hiernach sind die Schw. der Luftplatten eigentlich longitudinal, sie geschehen in den Richtungen der Platten. In jeder der gezeichneten Kreisrippungen bewegen sich die Lufttheilchen radial einwärts und auswärts; die Mittelpunkte dieser Kreise sind daher in Ruhe, und um sie wechselt bei jeder Schw. eine Verdichtung mit einer Verdünnung; die Ruhepunkte mit Dichtigkeitswechsel nennt Kundt (umschlossene) einfache Knoten. Leicht ist aus der Fig. zu ersehen, daß zwischen je 4 Rippungen eine zweite Art von Ruhepunkten vorhanden ist; da nämlich in je zwei benachbarten stehenden Wellen entgegengesetzte Phasen stattfinden, so bewegen sich von 2 Kreisen her die Theilchen nach diesen Ruhepunkten hin, während in den 2 anderen Kreisen die Bewegung von den Ruhepunkten weg stattfindet. Kundt nennt diese Ruhepunkte ohne Dichtigkeitswechsel doppelte Knoten. Bei anderen Fig. treten auch nicht umschlossene einfache Knoten auf, in denen zwar Ruhe mit Dichtigkeitswechsel herrscht, aber ohne die entgegengesetzte Bewegung der Theilchen, die bei den umschlossenen einfachen Knoten vorhanden ist. Kundt hat auch die math. Theorie der schwingenden Luftplatten aufgestellt und aus derselben nicht blos die eben betrachteten Eigenthümlichkeiten der Schwingungsform, sondern auch die Gesetze der Schwz. abgeleitet, welche durch die Versuche bestätigt werden; die Schwz. ist hiernach unabhängig von der Dicke der Platte, ist bei geschlossenen Platten halb so groß als bei offenen; die wirkliche Schwz. stimmt auch bei den geschlossenen Platten mit der theoretischen, bei den offenen aber nicht, was sich bei der Betrachtung der Pfeifen (251.) erklären wird.

Fig. 154.



249 **Longitudinale Schwingungen der Stäbe** (Chladni 1796; Poisson 1816). Stäbe von Holz oder Metall werden in Längsschwingungen versetzt, indem man sie mit beharzten Fingern oder mit einem beharzten Tuch- oder Lederlappen der Länge nach reibt; Glasstäbe und Glasröhren reibt man mit einem nassen Tuche. Die Bewegung solcher Stäbe besteht aus stehenden Longitudinalwellen; dieselben unterscheiden sich von den fortschreitenden Longitudinalwellen dadurch, daß in diesen die abwechselnde größte Verdichtung und Verdünnung (nach 236.) an der Stelle sich befinden, wo die Theilchen die größte Schwingungsgeschwindigkeit haben, während die stehenden Längswellen die größte Verdichtung und Verdünnung an den Knoten, die natürliche Dichtigkeit aber an den Bäuchen erhalten; denn zu beiden Seiten eines Knotens bewegen sich (nach 227.) die Theilchen nach entgegengesetzten Richtungen, also entweder beiderseits nach den Knoten hin, wodurch Verdichtung entsteht, oder beiderseits von den Knoten weg, wodurch Verdünnung stattfindet. In dem Moment, wo an dem einen Knoten die stärkste Verdichtung geschieht, ist an dem benachbarten die stärkste Verdünnung, weil die Theilchen, die dem ersten Knoten zuströmen, sich von dem letzten entfernen. Nach der Mitte zwischen zwei Knoten, also nach dem Bauche hin, strömen folglich von dem einen Knoten her die Theilchen, während sie auf der anderen Seite von dem Bauche weg dem anderen Knoten zuströmen; hierdurch bleibt an den Bäuchen die natürliche Dichtigkeit erhalten. — Die Schwingungszahl, also auch die Höhe eines Longitudinaltones ist unabhängig von der Dicke des Stabes, steht aber in umgekehrtem Verhältnisse zu der Länge und der Quadratwurzel aus dem spec. Gew. und in geradem Verhältnisse zu der Wurzel aus der Elasticität.

Beweis. Ein Stab sei wie eine Saite beiderseits eingespannt und schwinge in seiner ganzen Länge l, als eine einzige stehende Welle; dieselbe geht hervor durch die Interferenz einer fortschreitenden Welle von der Länge $2l$; daher gilt hier die Formel (28), wenn wir in derselben $2l$ statt l setzen; also ist $T = 2l\sqrt{(d/e)}$; da die Theilchen eines durch eine reibende oder ziehende Kraft verlängerten Stabes durch ihre Elasticität wieder zurückkehren, so bleibt in dieser Formel e unverändert; d die Masse der Volumeinheit aber ist gleich dem Gewichte der Volumeinheit dividirt durch g, also $= s/g$, wenn s das spec. Gewicht bedeutet; folglich ist $T = 2l\sqrt{(s/eg)}$. Da nun $n = 1/T$ ist, so ergibt sich

$$n = (1/2l)\sqrt{(eg/s)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (34)$$

worin das angegebene Gesetz enthalten ist. Der Nachweis ist einfach zu führen: dicke und dünne Stäbe von demselben Material und derselben Länge geben denselben Ton; Stäbe von 2, 3, 4 . . mal kleinerer Länge, aber von demselben Stoffe geben die Obertöne des Tones, den ein Stab von einfacher Länge ergibt. Gleich lange Stäbe von verschiedenem Stoffe erzeugen verschiedene Töne, deren Höhe mit dem Quotienten $\sqrt{(eg/s)}$ oder was dasselbe ist, $\sqrt{(e/d)}$ im Verhältnisse steht. Auch Saiten können, wie schon Chladni (1787) fand, in longitudinales Tönen versetzt werden und folgen hierin denselben Gesetzen wie die Stäbe, so daß ihre Schwz. unabhängig von der Spannung wird. — Der Quotient $(\sqrt{e/d})$ oder $\sqrt{(eg/s)}$ drückt aber nach Fl. (29) die Fortpflanzungsgeschw. c der longitudinalen Wellen des Stabtones aus; setzen wir demnach statt $\sqrt{(eg/s)}$ in der Fl. (34) die Geschw. c, so erhalten wir $n = c/2l$ oder $c = 2ln$. Indessen folgt diese wichtige Gleichung auch schon aus Fl. (25); in dieser Fl. $l = c/n$ bedeutet nämlich l die Länge der fortschreitenden Welle, welche bekanntlich doppelt so groß ist, als die Länge der aus ihr hervorgehenden stehenden Welle, also auch als die Länge l des als Ganzes schwingenden Stabes; setzt man daher dort $2l$ statt l, so entsteht $2l = c/n$, worin jetzt l die Länge des Stabes bedeutet; hieraus folgt abermals die Formel $c = 2ln$ . . . . (35)

Mittels dieser Formel läßt sich die Fortpflanzungsgeschw. des Schalles in einem Stabe berechnen, wenn man die Höhe des Longitudinaltones desselben kennt. Auch folgt aus derselben, *daß die Geschw. in verschiedenen Stäben von gleicher Länge sich wie die Schwz. der Töne dieser Stäbe verhält*, so wie *daß in gleich hoch tönenden Stäben die Geschw. im geraden Verhältnisse zur Länge derselben steht*. — Beiderseits festgehaltene Stäbe können auch longitudinal in gleichen Theilen, also mit 1, 2, 3 . . . Knoten schwingen, wodurch die Schwzn. nach dem Gesetze 2, 3, 4 . . . mal größer werden und daher die harmonischen Obertöne bilden; doch ist es schwierig dieselben hervorzurufen. — Stäbe, die an beiden Enden frei sind, können nicht als Ganzes schwingen, weil man sie doch an irgend einer Stelle halten muß, wenn man sie zum Tönen bringen will, und weil diese festgehaltene Stelle jedenfalls ein Knoten wird. Durch einen Knoten aber pflanzt sich die Schwingungsbewegung wie in allen Fällen, so auch hier fort, da der Knoten nicht ein absoluter Ruhepunkt, sondern nur ein Durchgangspunkt entgegengesetzter Bewegungen ist. Klemmt man einen wagrechten Stab in der Mitte fest und reibt die eine Hälfte bis zum Tönen, so wird eine das andere Ende berührende hängende Kugel heftig weggeschleudert. Glasröhren, die man in der Mitte faßt, kann man durch Reiben der einen Hälfte so heftig erschüttern, daß die andere Hälfte in ringförmige Stücke zerbricht. Auch wird durch das Tönen eines Glasstabes seine innere Constitution so verändert, daß er sich gegen durchgehendes Licht anders verhält wie in der Ruhe. Für beiderseits freie Stäbe gelten Fl. (34) und (35), weil sie an den freien Enden Bäuche haben, weil also die zwei Hälften schwingen wie die Hälften eines beiderseits festgehaltenen Stabes. Sie können auch mit 2, 3, 4 . . . Knoten schwingen und geben dann ebenfalls die harmonischen Obertöne. — Ein einesends freier Stab kann an dem freien Ende keinen Knoten haben, weil hier eine Verdichtung wegen Mangels an Gegenwirkung unmöglich ist; das freie Ende ist ein Bauch, der Stab schwingt als halbe stehende Welle, wie die Hälfte eines doppelt so langen beiderseits befestigten oder beiderseits freien Stabes; daher lautet Fl. (34) für diesen Fall $n = (1/4l)\sqrt{(eg/s)}$ und Fl. (35) nimmt die Gestalt an $c = 4ln$. *Die Schwz. eines an einem Ende festen Stabes ist halb so groß und demnach der Grundton eine Octave tiefer, wie bei einem gleich langen beiderseits festen oder freien Stabe.* Schwingt ein solcher Stab mit Knoten, so muß das freie Ende immer ebenfalls ein Bauch sein; folglich ist das frei schwingende Endglied nur eine halbe Welle, nur die Hälfte der übrigen Glieder; der letzte Knoten liegt also um $^1/_3$, $^1/_5$, $^1/_7$ . . . der Stablänge von dem freien Ende entfernt; die Wellen sind 3, 5, 7 . . . mal kürzer als für den ganzen Stab, die Schwz. also 3, 5, 7 mal größer als die des Grundtones. *Ein an einem Ende freier, am andern Ende fester Stab gibt also nur die ungeradzahligen Obertöne, während ein beiderseits freier oder beiderseits fester Stab alle Obertöne erzeugen kann.* Berechnet man den transversalen und den longitudinalen Grundton eines und desselben Stabes (siehe Aufg. 416 u. 420), so ergibt sich der longitudinale Ton als viel höher wie der transversale; durch Vergleichung der Formel (33) und (35) erfährt man, daß die Zahl der longitudinalen Schw. sich zu derjenigen der transversalen verhält, wie die Länge des Stabes zur $3^1/_2$fachen Dicke desselben, wenn hierbei der Stab am einen Ende fest ist, wie eben jene beiden Aufgaben zeigen. Doch ist leicht ersichtlich, daß man Stäbe herstellen kann, deren Längs- und Querton von derselben Höhe ist; von solchen Stäben hat Terquem (1858) nachgewiesen, daß beide Töne immer gleichzeitig auftreten.

Die *Schwingungen flüssiger Stäbe* wurden bereits 1834 von Cagniard-Latour untersucht; eine in einer Glasröhre befindliche flüssige Säule wurde durch Reiben der Glasröhre zum Tönen gebracht; die beiderseits offene Röhre gab die höhere Octave des Tones

der an einem Ende geschlossenen Röhre, bestätigte also auch hier das oben für die festen Stäbe gefundene Gesetz. Wertheim (1848) brachte eine an einer Seitenwand eines großen mit Wasser gefüllten Gefäßes angeschraubte Pfeife im Wasser zum Tönen, indem er durch comprimirte Luft einen Wasserstrom durch dieselbe in das Wasser des Gefäßes trieb; er fand das Gesetz der Längen auch für die flüssigen Stäbe bestätigt; dagegen gehorchte die flüssige Säule nicht der Fl. (35) $n = c / 2l$; vielmehr betrug die Schwz. nur $n \sqrt{2/3}$. Wertheim erklärte diese Abweichung durch die Annahme, daß auch in den flüssigen Stäben wie in den festen (nach 65.) bei einer Längendilatation eine Quercontraction und bei einer Längencontraction eine Querdilatation von $1/3$ auftrete; hierdurch würde (274.) die Geschw. des Schalles in einer flüssigen Säule $= \sqrt{2/3}$ mal der Geschw. in der unbegrenzten Flüssigkeit, wodurch in Fl. (35) sich n in demselben Verhältnisse ändere. Helmholtz (1870) sprach sich gegen diese Annahme aus, weil sie voraussetze, daß eine durch einen Druck verkürzte Säule sich ohne Hinderniß im Querschnitte dilatiren könne, was doch bei einer in ein Glas- oder Messingrohr eingeschlossenen flüssigen Säule unmöglich zu erwarten sei; indessen sei zu vermuthen, daß gerade die Elasticität der Wand, die Dicke derselben und der Durchmesser der Röhre einen Einfluß auf die Tonhöhe und sonach auf die Geschw. des Schalles in der Flüssigkeit ausüben könne. Diese Vermuthung wurde durch Versuche von Kundt (1874) bestätigt, welche den Zweck hatten, stehende Wellen in flüssigen Säulen zu erzeugen und dieselben durch *Staubfiguren* sichtbar zu machen. Eine weite Glasröhre war am einen Ende zugeschmolzen oder durch einen Kautschukstopfen oder eine Membran geschlossen; das andere Ende war ebenfalls durch einen Stöpsel geschlossen; doch ging durch denselben eine engere, geschlossene Glasröhre in die weitere mit Flüssigkeit erfüllte Röhre. Wurde nun der äußere Theil dieser engen Röhre gerieben, so pflanzten sich die Schw. auf die Flüssigkeit fort; diese theilte sich in kleine stehende Wellen, die man an höchst feinem auf den Wänden der Glasröhre ausgebreiteten Eisenpulver erkennen und messen konnte. Die Entstehung dieser kleinen Wellen wird folgendermaßen bewirkt: da die enge Röhre ihre Schw. auf die Flüssigkeit überträgt, so schwingen beide in gleichen Zeiten, haben also auch gleiche Schwz. Weil nun $l = c / 2n$, jedoch aber die Schallgeschw. c des Wassers ungefähr der 4te Theil von der des Glases ist, so ist auch die Wellenlänge l für das Wasser etwa der 4te Theil von der Wellenlänge des Glases. Ist daher die engere Röhre ebenso lang wie die weitere, so theilt sich das Wasser in 4 stehende Wellen. Umgekehrt, kennt man die Länge dieser Wellen, und man kann sie an der weiten Röhre mit dem Zirkel abmessen, so erhält man nach der Fl. $c = 2 l n$ die Geschw. des Schalles im Wasser. Als nun Kundt nach und nach Röhren von verschiedener Weite und Wanddicke anwandte und immer c nach den Wellenlängen berechnete, ergab sich, daß c immer größer wurde, wenn die Wanddicke zunahm und die lichte Weite der Röhre abnahm. Hiermit war die Vermuthung von Helmholtz bestätigt.

Wichtiger als die Schwingungen flüssiger Stäbe sind die der luftförmigen Stäbe oder der Luftsäulen, welche seit den ältesten Zeiten als Pfeifen musikalisch verwendet werden.

Longitudinale Schwingungen von Luftsäulen. Damit Luftsäulen in andauernde Schwingungen gerathen können, müssen sie in einerseits oder beiderseits offene Röhren, in der Akustik *Pfeifen* genannt, eingeschlossen sein; hiernach unterscheidet man *gedeckte* und *offene Pfeifen*. Ein Luftsäule wird in Schwingungen versetzt, wenn ein Luftstrom an dem einen Ende reibend vorbeigeht, oder wenn ein in der Pfeife sitzendes dünnes, elastisches Stäbchen, Zunge genannt, schwingt und seine Schwingungen der Luftsäule mittheilt; das erste geschieht in den *Lippenpfeifen*, das letzte in den *Zungenpfeifen*. Da eine Luftsäule wie ein elastischer Stab vermöge ihrer Elasticität schwingt, so gilt hier das Grundgesetz in 249. über die schwingenden Stäbe. Ein gedecktes Luftsäulenende entspricht einem eingespannten Stabende; es muß einen Schwingungsknoten bilden, weil die den Boden berührenden Theilchen unmöglich longitudinal schwingen können; für eine gedeckte Pfeife gelten demnach dieselben Gesetze wie für einen einerseits befestigten Stab. Ein offenes Luftsäulenende entspricht einem freien Stabende, aber nicht vollständig; denn ein freies Stabende mit seinen großen Elasticitätskräften kann von dem äußeren Luftdrucke keinen Einfluß erfahren; die Luft einer Röhrenmündung wird aber bei jeder Verdünnung oder Verdichtung auf die äußere Luft wirken und von dieser eine Gegenwirkung erfahren; eine offene Pfeife wird also den Gesetzen für einen beiderseits freien Stab nicht absolut genau folgen.

250

1. Die gedeckte Lippenpfeife (Daniel Bernoulli 1762). Als Urbild derselben wählen wir die gedeckte, viereckige, hölzerne Orgelpfeife (Fig. 155).

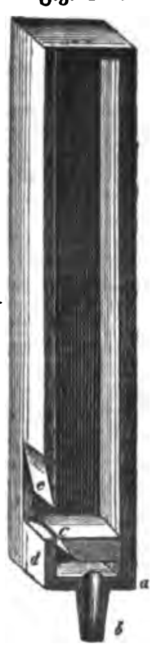


Fig. 155.

Durch das Mundstück b wird die Luft in den Fuß a geblasen; die Luft strömt durch die Windspalte c hinter der Unterlippe d aus und stößt gegen die Oberlippe e; hierdurch wird der Luftstrom getheilt, und der eine Theil verdichtet die Luft der Röhre. Diese Verdichtung zwingt auch diesen Theil, sich nach außen zu richten, wodurch jetzt eine Verdünnung entsteht. Verdichtung und Verdünnung bilden eine Welle, die von dem gedeckten Ende reflectirt wird und mit einer neuen Welle zu einer stehenden Longitudinalwelle interferirt. Die Schwingungszahl ist nach Fl. (34) für den einerseits festen Stab $n = (1/4l)\sqrt{(eg/s)}$; hierin ist e, die Elasticität, gleich dem Luftdrucke, also gleich dem Barometerstande h multiplicirt mit dem spec. Gew. s' des Quecksilbers. Indessen muß hier noch ein Coëfficient eingeführt werden, der den Einfluß der Wärme angibt. Bei jeder Luftverdichtung wird nämlich wegen verbrauchter Arbeit Wärme erzeugt und bei jeder Verdünnung aus entgegengesetztem Grunde Wärme verzehrt; durch erhöhte Wärme aber wird die Luftspannung größer; an der verdichteten Stelle wird daher die Spannung vergrößert und an der verdünnten Stelle verkleinert. Aus dem ersten Grunde wird die Verdichtung rascher fortgepflanzt und demnach die Schwingungszeit kleiner; dasselbe findet vermöge des zweiten Grundes statt, weil das erneuerte Eindringen des Luftstromes in den Verdünnungsraum hierdurch beschleunigt wird. In der Lehre von der Wärme werden wir sehen, daß die Schwingungszahl durch diese Einflüsse $\sqrt{1,42}$ mal so groß wird, daß also

$$n = (1/4l)\sqrt{(1,42hs'g/s)} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (36).$$

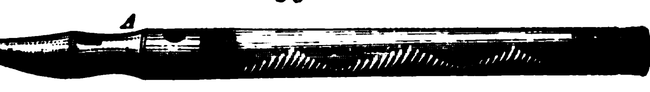
Da nun $n = c/4l$, so ist $c = \sqrt{(1,42hs'g/s)} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots (37).$

Schwingt eine gedeckte Luftsäule durch stärkeres Anblasen mit Knoten, so findet sich der erste in 1/3, 1/5, 1/7 ... der Pfeifenlänge vom freien Ende entfernt; die Töne machen 3, 5, 7 .. mal soviel Schwingungen als der Grundton: die gedeckte Pfeife erzeugt nur die ungeradzahligen Obertöne.

Man kann dies leicht durch stärkeres Anblasen einer Pfeife nachweisen; denn sie gibt dann die zweite Quinte, die dritte Terz, die dritte kleine Septime u. s. w. — Sichtbar machen kann man die Knoten und Bäuche einer Luftsäule: 1. Mittels des Tamburins von Hopkins (1838); ein ganz kleines, mit Sand bestreutes Tamburin wird in eine tönende Glasröhre hinabgelassen; an den Knoten liegt der Sand ruhig, an anderen Stellen hüpft er. 2. Mittels der Flammenzeiger von König (1862); an den Knotenstellen und Bauchstellen viereckiger Pfeifen sind dieselben durchlöchert und mit Membranen versehen; über diesen Membranen befinden sich kleine Zellen mit Gasbrennern, die von einem Gasbehälter gespeist werden; steckt man während des Tönens der Pfeife das aus den Brennern strömende Gas an, so zuckt an den Knoten die Gasflamme heftig hin und her, bleibt aber an den Bäuchen ziemlich ruhig; hieraus ist ersichtlich, daß an den Bäuchen die Membran keine Druckveränderung erfährt, daß also hier die Dichtigkeit der Luft unverändert bleibt, während an den Knoten die rasch wechselnde Verdichtung und Verdünnung der Luft und die dadurch hervorgebrachte Aus- und Einbiegung der Membran an dem Zucken der Flamme zu erkennen ist. 3. Mittels der Staubfiguren von Kundt (1866). Eine lange durch Kork verschlossene Glasröhre wird mittels Reiben zum Longitudinaltönen gebracht; die Schw. theilen sich in gleicher Zahl und Zeit durch den Kork der Luft mit und erzeugen in derselben eine größere Zahl von stehenden Wellen; denn aus der Fl. $l = c/2n$ ergibt sich für Luft ein viel kleineres l als für Glas, weil c für die Luft viel kleiner ist als für Glas. Da die Schallgeschw. im Glase die 16fache von der in Luft ist, so ist die Länge der stehenden Luftwellen bei gleicher Schwz. der 16te Theil von der Länge der Glas-

welle; wird also die Glasröhre, z. B. durch Anfassen in der Mitte, in eine einzige stehende Welle verwandelt, so entstehen in ihr 16 Luftwellen. Diese zahlreichen Luftwellen sind sichtbar, wenn man in der Röhre vorher Bärlappsamen herumgeschüttelt hat; derselbe ordnet ich in ganz gleiche zierliche Figuren; für den Fall, daß die Länge der Luftsäule ein Vielaches der Länge der stehenden Luftwelle des Tones ist, geht der Staub ganz von den Bäuchen weg an die Knoten; findet jenes Verhältniß nicht statt, so bleibt in zierliche Schichten geordneter Staub auch zwischen den Knoten, die entweder durch sternförmige Figuren oder urch größere Staubhäufchen ausgezeichnet sind. Mit Alfred Mayers Pfeife (Fig. 156) önnen die Staubfiguren in etwas veränderter, aber sehr einfacher Weise gezeigt werden 1879). Nach V. . Lang (1879) assen sich die Knotenstellen einer Pfeife auch mitels des Ohres

Fig. 156.



vahrnehmen, indem man mit dem Ohre längs der Pfeife hinfährt, wobei die Intensität des Lones bedeutend wächst, wenn das Ohr den Knoten passirt; auch wächst die Intensität des Pfeifentones bedeutend, wenn ein sogenannter Sucher, ein einerseits offenes und andereits mit Thierblase überbundenes Glasröhrchen an einem Faden in die Pfeife hinabgelassen vird und dabei den Knoten passirt.

Daß die Länge der gedeckten Pfeife für den Grundton gleich ¼ der fortschreitenden Wellenlänge des Tones ist, kann man entweder durch Berechnung nach Fl. (36) zeigen oder urch einen Versuch mittels Stimmgabel und Glascylinder; hält man über die Oeffnung ines solchen eine tönende Stimmgabel, während man Wasser eingießt, so wird in einem gewissen Augenblicke das Gefäß mittönen; die Berechnung ergibt, daß in diesem Augenblicke ie Länge der Luftsäule in dem Gefäße gleich ¼ der Wellenlänge des Stimmgabeltones ist. Nur in diesem Falle kann nämlich die Gabel ihren Ton der Luftsäule mittheilen (Analogie nit Meldes Apparat); denn während die Gabel voranschwingt, also in der halben Schwingungszeit, schreitet die Verdichtung um ½ Wellenlänge, bis an den Boden der Pfeife und urück bis zur Gabel fort; jetzt folgt die Verdichtungswelle der Gabel auf ihrem Rückgange, o daß die entstehende Verdünnung sich während des Rückganges ebenfalls um die halbe Wellenlänge, also die Röhre voran und zurück fortpflanzen kann und mit der Gabel gleicheitig an der äußersten Grenze des Rückganges anlangt. Wäre aber die Röhre z. B. länger ls ¼ der Wellenlänge, so wäre die Verdichtung noch auf dem Rückwege, wenn die Verdünnung schon im Fortschreiten wäre, sie würde folglich von dieser aufgehoben werden. — Daß die Schwz. umgekehrt mit der Länge wächst, sieht man an Pfeifen, die 2, 3, 4 . . . mal ürzer sind als eine andere und die harmonischen Obertöne ergeben, oder an Pfeifen, die /₈, ⁵/₄, ⁴/₃ . . . mal kürzer sind als eine andere und so die Töne der Dur-Tonleiter hervorbringen; hierzu benutzt man auch die Stimmpfeife, in welcher ein Kolben von Kork nittels einer graduirten Stange verschoben werden kann; dadurch erhält die gedeckte Luftäule solche verschiedenen Längen, wie sie für eine Tonleiter nothwendig sind; in ähnlicher Weise stimmt man gedeckte Orgelpfeifen, indem man den Deckelkolben mehr in die Röhre chiebt oder mehr zurückzieht. Auch die Unabhängigkeit der Schwz. von dem Durchmesser iner Röhre ist leicht zu zeigen. Indessen gelten die zwei Gesetze über die Länge und den Durchmesser nicht absolut genau für die gedeckten Lippenpfeifen, weil das Mundende der Luftäule nicht gleichzeitig in seinem ganzen Querschnitte in Schw. versetzt wird, und weil auch as Mundstück die Schallwelle reflectirt; hierdurch ist der Bauch nicht ganz genau an dem Mundende und der Knoten nicht genau an der Deckung, die Wellenlänge wird etwas größer er Ton etwas tiefer. Die Vertiefung ist um so größer, je größer die Weite der Röhre ınd je enger der Mund ist; diesen Umstand benutzt man, um mittels der sogenannten Bärte, Seitenlappen des Mundloches, Orgelpfeifen zu stimmen. Anwendung finden die geeckten Pfeifen in den Orgeln; die tiefste Octave, c_{-3} bis h_{-3}, wird in den gewöhnlichen Orgeln durch gedeckte Pfeifen erzeugt, weil dieselben, wie wir noch sehen werden, nur die halbe Länge offener Pfeife für jene Töne nöthig haben; doch haben die größten Orgelwerke uch diese tiefste Octave in offenen Pfeifen, die dann bis über 30′ Länge haben müssen. Auch höhere Register der Orgel wie das Flötenregister bestehen aus gedeckten Pfeifen, weil ieselben sanfter und gedämpfter klingen als die offenen Pfeifen. Die Clarinette ist eine am Mundstück gedeckte Pfeife, aber eine Zungenpfeife. Aus gedeckten Pfeifen ohne Lippen besteht ie Panspfeife (Syrinx); die Weidenpfeife der Kinder dagegen ist eine gedeckte Lippenpfeife.

Eine neue, sehr sinnreiche, aber etwas complicirte Methode der optischen Analyse er Klänge einer gedeckten Pfeife von Boltzmann und Töpler (1870) macht es nicht ur möglich, die Schwingungsbewegung eines Pfeifentones zu sehen, sondern auch die Verichtung und Verdünnung an einem Knoten zu messen, ja sogar die Größe der Schw. der

einzelnen Lufttheilchen zu berechnen. Die Methode vereinigt die Principien der Stroboskopie und der Interferenz. Das erste Princip wird mit intermittirender Beleuchtung durchgeführt. Bekanntlich erscheint ein in dunkler Nacht fliegender, aber plötzlich von einem Blitzstrahl beleuchteter Vogel in Ruhe. Ebenso erscheint eine im Dunkeln schwingende Saite in ihrer äußersten Lage links in Ruhe, wenn man sie im ersten Momente einer Schwingungszeit beleuchtet; beleuchtet man sie z. B. nach $5^1/_4$ Schwingungszeiten wieder, so erscheint sie etwa in einer halben Verschiebung nach links in Ruhe; wird sie nach abermals $5^1/_4$ Schwingungszeiten beleuchtet, so sieht man sie in der mittleren Lage in Ruhe; fährt man so weiter fort, so sieht man die Saite langsam ihre verschiedenen Schwingungslagen wechseln, sie zeigt uns ihre ganze schwingende Bewegung, nur 21 mal langsamer, so daß man sie deutlich verfolgen kann. Um nun eine intermittirende Beleuchtung zu erzeugen, war auf einer Stimmgabel, die nach der Helmholtz'schen Methode mittels eines Elektromagnetes in ununterbrochenen, starken Schw. erhalten wurde, ein schwingender Spalt angebracht, durch welchen Sonnenstrahlen intermittirend nach der Pfeife gingen; und zwar traf die unterbrochene Beleuchtung die gedeckte Stelle in der Weise, daß die halbe Beleuchtung durch den Knoten in der Pfeife, die andere durch die ruhige Luft außerhalb der Deckung ging. Da sich das Licht in der Verdichtung des Knotens langsamer fortpflanzt als in der äußeren Luft, so erfuhren die ersteren Strahlen gegen die letzteren eine Verzögerung in der Phase, welche man durch öfters wiederholte Reflexionen der ersteren Strahlen im Inneren der Pfeife bis auf eine halbe Wellenlänge steigern konnte; dann wurden die zwei verschiedenen Strahlenbündel wieder mit einander vereinigt und mußten daher nach den Gesetzen der Interferenz einander aufheben, es mußte ein dunkler Streifen entstehen. War die Unterbrechungszeit der Beleuchtung richtig gewählt, so mußte dieser Interferenzstreifen hin- und hergehen und mit beliebiger Langsamkeit die Schw. der Lufttheilchen nachahmen, und durch die gemessenen Dimensionen Angaben für die Berechnungen liefern. Wurde der Grundton angeblasen, so ergab sich, daß die Schwingungsbewegung eine vollkommen pendelartige war; der Unterschied zwischen der größten und kleinsten Dichte betrug am Knoten $^1/_{80}$ at, während Kundt schon 1868 mit seinem Manometer $^1/_{20}$ at und Mach (1873) für Glasstäbe Unterschiede von 3—400 at demonstrirte. Die totale Verschiebung eines Lufttheilchens in der Nähe des Pfeifenmundes betrug 2,5mm, im Munde selbst 8mm. Wurde das Anblasen so verstärkt, daß der erste Oberton mit dem Grundtone zusammenklang, so standen die Streifen abwechselnd still und bewegten sich dann sprungweise, weil abwechselnd die Verdichtung des Grundtones mit der Verdünnung oder Verdichtung des Obertones zusammenfällt; die Schwankung der Luftdichte betrug $^1/_{56}$ at, die Totalverschiebung eines Lufttheilchens im Bauche 5mm, im Munde 17mm; die Amplitude des Obertones war der 4te Theil und die Intensität desselben der 16te Theil von den betreffenden Größen des Grundtones. Bei einem Versuche Machs (1878) betrug die Luftverdichtung in einer Pfeife 0,03, durch einen elektrischen Funken 0,13.

251 **2. Die offene Lippenpfeife** (Daniel Bernoulli 1762). Die Tonerregung geschieht hier wie bei der gedeckten Pfeife; da aber das offene Luftsäulenende keinen Knoten, sondern nur einen Bauch bilden kann, wie die Erregungsstelle selbst, so besteht die einfachste Schwingungsweise der offenen Pfeife darin, daß sie in der Mitte einen Knoten hat, also ebenso schwingt wie eine gedeckte Pfeife von halber Länge; hieraus ergibt sich die Schwingungszahl einer offenen Pfeife.

$$n = (1/2l)\sqrt{(1{,}42hs'g/s)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (38).$$

Da nun $n = c/2l$, so ist auch hier $c = \sqrt{(1{,}42hs'g/s)}$ . . . . (39).

Aus Fl. (38) folgt zunächst für offene Pfeifen dasselbe Gesetz der Längen und des Durchmessers wie für gedeckte Pfeifen und Stäbe; sodann ergibt dieselbe, daß *der Grundton einer offenen Pfeife eine Octave höher ist als der Grundton einer gedeckten Pfeife von gleicher Länge.* — Endlich kann eine offene Pfeife auch wie ein beiderseits freier Stab mit 2, 3, 4 . . . Knoten schwingen; sie erzeugt dann Töne von 2, 3, 4 . . . mal so viel Schwingungen, als sie der Grundton enthält; *die Obertöne einer offenen Pfeife bilden also die ununterbrochene Reihe der harmonischen Obertöne.*

Man weist dies leicht durch eine beliebige offene Pfeife nach, die bei stärkerem Anblasen die Octave, die zweite Quinte, die zweite Octave, die dritte Terz, Quinte, kleine Septime u. s. w. des Grundtones gibt. Das Sichtbarmachen der Knoten kann nach den zwei ersten Methoden für gedeckte Pfeifen geschehen. Das Gesetz der Längen hat so vielfache Anwendung, daß man sich häufig genug von dessen Geltung überzeugen kann; für die tiefen Orgeltöne sind lange Pfeifen nöthig, z. B. für c_{-2} eine Pfeife, deren Länge nach (39) = c / 2n

= 333 / 64 = 5,17^{m} = 16 Fuß ist; man nennt daher dieses c auch das 16füßige, und das eine Octave tiefere c_{-3} das 32füßige, obwohl man dasselbe gewöhnlich durch eine gedeckte Pfeife von der halben Länge erzeugt. Der höchste Orgelton c_5 bedarf dagegen nur einer Pfeife von 4^{cm}. — Die Posaunen erhalten die größere Länge durch Ausziehen der Theile, andere Instrumente werden durch Löcher und Klappen verkürzt oder verlängert; denn eine hinreichende große Oeffnung in einer Pfeife macht diese Stelle zu einem offenen Ende, also die Pfeife kürzer, wenn die Klappe dieser Oeffnung oder der darauf gesetzte Finger gehoben wird. — Wenn nun auch die offenen Pfeifen dem Gesetze der Längen im Allgemeinen folgen, so gehorchen sie doch der Fl. (38) durchaus nicht so genau, daß man mittels derselben die Länge einer Pfeife für einen bestimmten Ton unter allen Umständen berechnen könnte. Zunächst haben die Weite und Höhe des Mundes und der Fuß denselben Einfluß wie bei den gedeckten Pfeifen; hier findet aber auch noch eine Einwirkung des offenen Endes statt; denn die Schw. pflanzen sich noch über dieses Ende hinaus in die freie Luft fort und werden erst allmälig von dieser, und zwar deßhalb reflectirt, weil dieselbe freier beweglich und dadurch dünner als die innere Pfeifenluft erscheint. Man kann dieses Uebergreifen der Bewegung an einer mit Sand bestreuten Membran sehen; hält man dieselbe über das offene Ende einer tönenden Pfeife, so hüpft der Sand. Hierdurch wird demnach die Wellenlänge größer, der Ton also etwas tiefer; nach Helmholtz (1859) tönt eine offene Pfeife wegen des offenen Endes so, als ob sie um 0,785 r länger wäre, wobei r den Radius der Oeffnung bedeutet; nach Lord Rayleigh (1874) beträgt diese Correctur 0,824 r. Noch mehr weichen die Pfeifentöne von Fl. (38) ab, wenn der Querschnitt im Verhältnisse zur Länge bedeutend ist, besonders wenn wie bei der *cubischen Pfeife* der Abstand des Mundes von der Hinterfläche der Pfeife groß wird. An die Stelle von Fl. (38) tritt dann für die practische Berechnung der Pfeifenlänge der Satz von Cavaillé-Coll (1860): die Pfeifenlänge ist gleich der Wellenlänge des Tones weniger der doppelten Tiefe der Pfeife, ein Gesetz, das Wertheim in Uebereinstimmung mit der Theorie fand. — Das Gesetz über den Zusammenhang offener und gedeckter Pfeifen läßt sich an jeder offenen Pfeife zeigen, die ihre tiefere Octave gibt, wenn man sie oben verschließt, oder auch mit der Stimmpfeife, die ihre höhere Octave gibt, wenn man den Kolben ganz herauszieht. Genau tritt die Octave nicht ein, sondern der Ton der gedeckten Pfeife ist etwas höher als die tiefere Octave des Tones der offenen Pfeife, weil der Einfluß des offenen Endes bei der offenen Pfeife zweimal, bei der gedeckten nur einmal eintritt, was Bosanquet (1878) von Neuem untersuchte. Theilweises Decken einer offenen Pfeife bringt eine geringe Vertiefung des Grundtones hervor; dies benutzt man zum Stimmen offener Pfeifen, indem man seitliche Lappen an dem offenen Ende von Zinnpfeifen, die sogenannten Bärte, oder die Bleiplatten der Oeffnung ein- oder auswärts biegt. Aehnliches bezwecken die Hornisten durch Stopfen des Schallbechers mit der Hand. — Wie ein langer, dünner Stab leichter in eine größere Zahl von stehenden Wellen zu zerlegen ist als ein kurzer dicker, so ist es auch mit den Luftsäulen; bei langen, dünnen Luftsäulen sprechen die Obertöne leichter an als der Grundton, bei Säulen von größerem Querschnitte der Grundton leichter als die Obertöne. Orgelpfeifen, die bekanntlich nur auf ihren Grundton beansprucht werden, müssen daher große Durchmesser haben; auch bei den Holzblasinstrumenten wird die Weite im Verhältnisse zur Länge nicht zu klein genommen, da man hier nur die tieferen Obertöne benutzt und die höheren Töne durch Klappen erzeugt. Ebenso erlauben weitgebaute Blechinstrumente, wie die Ophicleïde, das Bombardon und das Serpent noch die Benutzung des Grundtones; in vielen Blechinstrumenten aber ist die Weite der Röhre klein und die Länge sehr groß, so daß man nur die höheren Obertöne erzeugen kann; die Lücken der Tonleiter werden jetzt ebenfalls durch Klappen ausgefüllt, bei den Posaunen durch Ausziehen. — Daß die Tonhöhe der Pfeifen nicht von dem Material der Wände beeinflußt ist, folgt schon daraus, daß das Festhalten der Instrumente mit der Hand, was nothwendig die stärkeren Schw. der Wände aufhebt, keinen Einfluß ausübt; dies gilt aber nur so lange als das Material fest ist; schlafferes Material, wie z. B. Pergament verändert auch die Tonhöhe. — Von den musikalischen Instrumenten sind die Piccolo-Flöte, die Flöte und viele Orgelpfeifen offene Lippenpfeifen.

Die im Eingange des Abschnitts über die gedeckte Pfeife gegebene Erklärung der Tonbildung der Lippenpfeifen wird nicht allseitig für genügend erachtet; sie setzt voraus, daß der eine Theil des Anblasestroms, der bald innerhalb, bald außerhalb der Pfeife sein soll, im ersten Falle verdichtend, also stoßend auf die Pfeifenluft wirkt; auch Tyndall spricht in seinem berühmten Werke (On sound 1867) von einem Geschwirre von Bewegungen, von unregelmäßigen Luftstößen, welche durch den vorbeistreichenden Luftstrom am Mundende der Pfeife entständen. Bekanntlich erzeugt jede Schw. eine fortschreitende Welle, eine schnelle Schw. ein kurze, eine langsame Schw. eine lange Welle; also entstehen auch in der Pfeife Wellen von verschiedener Länge. Die Wellen, deren Längen in einfachem Verhältnisse zur Pfeifenlänge stehen, werden am anderen Ende regelmäßig reflectirt und bilden so mit neu fortschreitenden Wellen die stehenden Wellen der Pfeifentöne. Wie Tyndall sich ausdrückt,

„wählt die Pfeife aus dem Geschwirre von Luftstößen die aus, mit denen sie im Einklange ist und erhebt sie zu der Würde musikalischer Töne". Der Orgelbaumeister Sonreck glaubt nun aus vielen Versuchen schliessen zu können, daß solche Luftstöße in der Pfeife nicht existiren und hält (1876) folgende Erklärung der Pfeifentonbildung für richtig: Wenn der Anblasestrom völlig an dem Oberlabium vorbei geht nach außen, reißt er fortwährend Lufttheile aus dem Innern der Pfeife mit sich fort, wodurch zunächst in der untern Luftschicht der Pfeife eine Verdünnung entsteht, die sich nach oben fortsetzt, bis sie in einer offenen Pfeife etwa die Mitte der Länge erreicht hat; dann ist der äußere Luftdruck im Stande, den Anblasestrom nach einwärts zu drücken, es schneidet sich am Oberlabium eine Luftwelle von dem Anblasestrom ab, welche die Verdünnung aufhebt und eine kleine Verdichtung zur Folge hat. Dieser Rückschlag pflanzt sich der Länge des Rohrs nach fort und stößt in der Mitte mit dem Druck zusammen, den die äußere Luft durch die obere Oeffnung auf die Luftsäule ausgeübt hat. Hierdurch entsteht in der Mitte eine starke Verdichtung, ein Wellenberg, der nach dem Schwingungsgesetze der Luftsäule den Ton erregt, während unten der Anblasestrom in seine vorige Lage zurückkehrt und eine neue Verdünnung erzeugt. Die bisher hypothetisch angenommenen Stöße lösen sich also in eine pendelartige Hin- und Herbewegung des Anblasestroms auf, die von der Elasticität der Luftsäule und dem äußeren Luftdruck abhängig und somit den Schwingungsgesetzen der Luftsäule unterworfen ist. Bei anderen Pfeifen kann der Luftstrom mehr nach dem Innern gerichtet sein, bringt aber dann statt vorwiegender Verdünnung in der Pfeife eine vorwiegende Verdichtung hervor, die in analoger Weise die pendelnde Bewegung des Anblasestroms bewirkt; bei gedeckten Pfeifen herrscht die erste Erregungsweise vor. Sonreck zeigt durch Manometerversuche die Verdünnung und Verdichtung, durch Färben der Luft mittels Rauch das Eindringen derselben u. s. w., und erklärt eine Anzahl von Eigenthümlichkeiten und Verschiedenheiten des Ansprechens, die bisher unklar geblieben, in befriedigender Weise. Lootens und van Tricht (1878) benutzten ebenfalls das Färben des Luftstroms durch Rauch, aber auch ein leicht bewegliches Phonoskop zum Studium des Anblasestroms. Nach ihren Untersuchungen theilt sich dieser an der Oberlippe, wie man bisher annahm, in 2 Theile, den nach außen gehenden Hauptstrom und den nach innen gehenden abgeleiteten Strom; dieser letztere ziehe eine Strecke an der Pfeifenwand hin, biege sich dann allmälig ab und endlich ganz herum wieder nach unten, wo er durch den Mund hinausdringe, so daß er eine Art von Wirbel bilde. Wenn der Ton nicht anspricht, so verliert der Wirbel sich in dem Anblasestrome, kommt nicht getrennt vom Hauptstrome nach außen; wenn aber die Pfeife richtig tönt, so durchzieht er selbständig den Anblasestrom und gelangt merklich geneigter als der Hauptstrom nach außen. Nach diesen Forschern soll die Tonbildung davon abhängig sein, daß der untere Theil des Wirbels den Anblasestrom durchkreuze, und hieran sollen die Schwingungen der Pfeifenwände wesentlich betheiligt sein. Denn setzt man diesen Schw. ein Hinderniß entgegen, so erhebt sich das Wirbelende und verliert sich in den Hauptstrom; dagegen springt es schärfer heraus, wenn man leichte Schläge auf eine Pfeifenwand ausübt und zwar im Tempo dieser Schläge. Die genannten Forscher halten es daher für wahrscheinlich, daß das Wirbelende im Tempo der Wandschwingungen den Anblasestrom unterbreche, wie die Platte einer Sirene den Luftstrom derselben; sie gelangen also zu dem entgegengesetzten Resultat wie Sonreck, daß die Pfeifentöne wie die der Sirene durch einen intermittirenden Luftstrom, durch Luftstöße entstünden.

Fig. 157.

252

3. Die Zungenpfeife (W. Weber 1827). Die Tonerregung geschieht bei der Zungenpfeife (Fig. 157 stellt die bei Orgeln gebräuchliche Einrichtung dar) durch einen intermittirenden Luftstrom, durch Luftstöße, wie bei der Sirene. Die Unterbrechung des Luftstromes geschieht aber hier durch ein elastisches Metallplättchen, Zunge genannt, das über einem nahezu gleichen, seitlichen Spalte der Röhre liegt und an dem einen Ende fest, an dem größten Theile seiner Länge aber frei beweglich ist und etwas von den Rändern des Windspaltes absteht. Wird nun durch das Luftrohr r Luft in den Fuß F geblasen, so strömt diese durch den Spalt in den Schallbecher (Aufsatzrohr) oder die Pfeife R und bringt dort eine Verdichtung hervor; da aber

in dem Fuße die Luft durch fortwährendes Nachströmen noch dichter ist, so wird die Zunge gegen den Spalt gedrückt, dieser wird geschlossen und der eindringende Luftstrom unterbrochen; nun kehrt die Zunge vermöge ihrer Elasticität, aber jedenfalls auch unter dem Einflusse der Luftmassen zurück, öffnet dadurch den Spalt wieder und erlaubt ein erneutes Einströmen der Luft, einen zweiten Luftstoß. So bildet sich aus periodischen Luftstößen der Ton und ist daher viel stärker, als wenn die Zunge für sich allein oder die Luft im Schallbecher für sich allein schwingen würde. Die Schwingungszahl wird durch die vereinigte Wirkung der Elasticität und der Dimensionen der Zunge und der Luftsäule im Schallbecher bedingt. Die Zunge würde für sich allein eine gewisse Schwingungszahl, einen Eigenton erzeugen, und ebenso würde die Luftsäule für sich allein schwingend gewisse Schwingungszahlen, ihrem Grundtone und ihren Obertönen entsprechend, ergeben. Stimmt der Eigenton der Zunge mit einem der Eigentöne der Röhre überein, so üben die beiden Elemente der Zungenpfeife keinen verändernden Einfluß auf einander aus. Findet aber diese Uebereinstimmung nicht statt, so wird der Zungenton erniedrigt, und diese Vertiefung ist um so bedeutender, je weniger tief der Zungenton unter einem der Eigentöne des Schallbechers liegt; sie ist am größten, wenn der Zungenton dem Grundtone der Röhre nahe kommt; sie beträgt dann nahezu eine Octave. Liegt der Zungenton dagegen dem ersten oder zweiten Obertone der Röhre nahe, so beträgt die Vertiefung nur eine Quarte, bez. eine Terz; noch geringer werden die Vertiefungen, wenn der Zungenton einem der höheren Obertöne nahe kommt. Sowie aber der Zungenton mit einem der Eigentöne der Röhre übereinstimmt, hört die Vertiefung sofort auf und der Zungenton springt plötzlich in seiner richtigen Höhe hervor, ein Sprung, der in dem ersten Falle einer Octave ganz nahe kommt. Doch gilt dies Alles nur für leicht bewegliche Zungen; schwere und steife Zungen erfahren durch die schwingende Luftsäule des Schallbechers keine oder nur eine geringe Veränderung der Tonhöhe, dagegen eine größere Verstärkung des Tones.

Erklärung und Nachweise. Wenn Zungenton und Röhrenton übereinstimmen, so schwingt die Zunge auch übereinstimmend mit den Lufttheilchen der Pfeife; es ist daher ein gegenseitig verändernder Einfluß unmöglich, die Pfeife tönt als offene Röhre, sie hat an der Zunge und an dem anderen Ende Bäuche und (bei dem Erklingen des Grundtones) in der Mitte einen Knoten. Stimmen aber Zungenton und Röhrenton nicht überein, so muß durch die verschiedene Bewegung von Zunge und Luft in der Gegend der Zunge Luftverdichtung und Luftverdünnung abwechseln, der Knoten muß näher an die Zunge rücken, die Pfeife wird mehr zu einer gedeckten. Beim Anblasen kann die Zunge sich nur voranbewegen in die Röhre hinein, wenn sie sich in einer Verdünnung befindet, deren Theilchen ebenfalls nach innen schwingen, wenn also der Knoten so zu sagen außerhalb der Pfeife, im Fuße liegt; die äußere neu eindringende Luft übt dann gegen die Verdünnung einen Druck aus, der die Zunge voranschiebt, aber zugleich ihrem Bestreben zurückzukehren, ihrer Elasticität entgegenwirkt und dadurch nach Fl. (28) die Schwingungszeit vergrößert. Bei der Rückkehr der Zunge nach außen ist sie in einer Verdichtung, die sie nach außen treibt, aber wiederum ihre Elasticität vermindert und daher ebenfalls die Schwingungszeit vergrößert. So erklärt sich die Vertiefung des Zungentones durch eine nicht übereinstimmende Röhre. Diese Vertiefung ist um so größer, je stärker die abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen sind. Eine leichte Vergleichung der hier denkbaren Fälle läßt aber erkennen, daß dieselben um so stärker werden, je näher der Grundton der Röhre über dem Zungentone liegt; denn alsdann kann die Zunge fast auf ihrem ganzen Wege gleichmäßig auf die Luft einwirken, ohne durch Umkehrung der Lufttheilchen eine Gegenwirkung zu erfahren. Ist also der Zungenton ganz nahe unter dem Röhrentone, so ist der Wechsel am stärksten, der in dem Fuße zu denkende Knoten fällt fast in die Zunge, die Pfeife ist an der Zunge gedeckt, sie gibt die tiefere Octave des offenen Pfeifentones; dieses ist die stärkste Vertiefung. Wenn der Zungenton in größerer Entfernung unterhalb des Röhrentones liegt, so wirkt die schwingende Zunge bald auf vorangehende, bald auf zurückkehrende Lufttheilchen, die Verdichtung und ebenso die Verdünnung werden weniger stark sein, der in dem Fuße zu denkende Knoten fällt weiter von der Zunge weg, der Zungenton wird weniger vertieft; die Vertiefung

ist fast gleich Null, wenn die Röhre nur $1/4$ der zum Eigentone der Zunge stimmenden offenen Pfeifenlänge hat. Ist also der Röhrenton viel höher als der Zungenton, so erfährt der letztere nur eine geringe Vertiefung. Diesen veränderlichen Einfluß verschiedener Röhrenlängen auf einen Zungenton kann man an einem Weizenhalme zeigen, an dem man einen kleinen, zungenförmigen Streifen bis auf eine Stelle losgeschnitten hat; derselbe gibt bei allmäligem Abschneiden des Halses immer höhere Töne; ebenso ein grüner Kornhalm, den man an dem einen Ende durch einen Druck gespalten und dadurch mit einer Doppelzunge versehen hat.

Ist der Zungenton höher als der Grundton der Röhre, so hebt die Zunge bei ihrer Rückkehr einen Theil der erzeugten Verdichtung wieder auf; daher wird anfänglich die Vertiefung nur gering sein; sie wird aber um so größer, je höher sich der Zungenton erhebt; weil eben durch die Aufhebung der Verdichtung die Elasticität der Zunge geschwächt wird, doch geht sie nicht wieder bis zu einer Octave, sondern nur bis zu einer Quarte; wenn der Zungenton doppelt so hoch als der Grundton der Röhre geworden ist, so stimmt er mit dem ersten Obertone derselben überein und springt daher plötzlich wieder in seiner vollen Höhe hervor. In ähnlicher Weise erklären sich die übrigen Erscheinungen der Zungenpfeife.

Da hiernach die Zungenpfeifen als mehr oder minder an der Zungenstelle gedeckte Pfeifen anzusehen sind, so geben sie viel tiefere Töne als offene Pfeifen von gleicher Länge; von dieser vertiefenden Wirkung der Zunge auf Pfeifen macht man Anwendung bei den Orgeln; das Posaunen- und das Trompetenregister der Orgel geben 32-, 16- und 8füßige Töne, ohne Pfeifen von diesen Längen zu besitzen; indessen sind sie doch länger als die Hälften dieser Maße; denn erstens ist die Deckung an dem Zungenende nicht vollständig, und zweitens läßt man diese Pfeifen an dem offenen Ende sich kegelförmig erweitern, um den Ton stärker und voller zu machen und den dumpfen Klang der Gedackten zu vermeiden; durch eine solche Erweiterung aber wird die Deckung noch unvollständiger, die Pfeifen nähern sich etwas den offenen und müssen daher etwas länger als die Gedackten sein. Dieser Unterschied tritt auch bei der Clarinette einerseits und der Oboë und dem Fagott andererseits hervor. Alle sind wie die Kinder- und die Straßentrompete Zungenpfeifen; die Clarinette verhält sich wegen der gleichen Weite des Rohres ganz wie eine gedeckte Pfeife, sie klingt eine Octave tiefer wie die Flöte und gibt nur ungeradzahlige Obertöne; Oboë und Fagott kommen aber wegen ihrer conischen Erweiterung den offenen Pfeifen nahe. Die Clarinette hat eine einfache Zunge aus italienischem Rohr geschnitten, die fest auf den Schnabel gebunden wird und beim Blasen die Mundöffnung fast schließt; Oboë und Fagott haben Doppelzungen, wie das Kornpfeifchen und die Weidenschalmei; die Zunge der letzteren ist eine am Ende gespaltene Weidenrindenröhre; dieselbe wird an einem aus Weidenrinde gewundenen Horne befestigt, das alsdann stark schallende Töne gibt und das Urbild der Schalmei, der Oboë und des Fagotts ist. Auch die Blechinstrumente, wie Horn, Trompete, Posaune, Bombardon, Ophicleïde u. s. w. sind Zungenpfeifen, ohne Zungen zu besitzen; diese werden durch die Lippen des Bläsers ersetzt, die fest zusammen und an das Mundstück gepreßt und durch einen aus dem schmalen Lippenspalte dringenden Luftstrom in Schwingungen versetzt werden, wie ein Zuschauer deutlich sehen kann, wenn das Mundstück aus Krystallglas besteht; in ähnlicher Weise erklärt sich auch das Pfeifen mit Lippe, Zunge und Zähnen. — Wenn bei eigentlichen Zungenpfeifen die Zunge breiter ist als der Windspalt, so schlägt eine solche aufschlagende Zunge auf die Ränder desselben und gibt dem Tone einen schnarrenden Beiklang, wie in den Schnarrwerken der Orgel; ist aber die Zunge kleiner als der Windspalt, also durchschlagend oder einschlagend, so fällt der schnarrende Klang weg; der Ton ist weich und voll, wie in dem Register vox humana der Orgel. — Wenn eine Zunge sehr weit ausgreift, so folgt sie dem Gesetze des Isochronismus (225.) nicht mehr genau, wie das Pendel bei großen Schw.; die Schw. werden dann etwas langsamer. An diesem Mißstande leiden besonders diejenigen Instrumente, die nur Zungen ohne Pfeifen enthalten, wie die Mund- und die Ziehharmonica, das Harmonium, das Accordeon, das Aeolodicon, die Physharmonica u. dergl., die alle bei starkem Anblasen tiefer klingen. Da die longitudinalen Schw. der Luft gerade im Gegentheile durch stärkeres Anblasen beschleunigt werden, so tritt jener Uebelstand bei Zungenpfeifen weniger hervor; ja er läßt sich sogar durch eine passende Wahl der Dimensionen ganz aufheben; Webers compensirte Zungenpfeife (1827).

Ein Zungeninstrument ist auch das Stimmorgan (Johannes Müller 1837) der Menschen und vieler Thiere; die Lunge bildet den Blasebalg, die Luftröhre das Windrohr, der Kehlkopf den Fuß, dessen oberster Theil die Zunge enthält, der Rachen und der Mund den Schallbecher. Der Kehlkopf besteht aus dem obersten, stärksten Ringe der Luftröhre, Ringknorpel genannt, aus dem Schildknorpel (Adamsapfel) und den zwei Gießkannenknorpeln, welche durch mehrere Muskeln zu verschiedenen Bewegungen befähigt sind. Die Schleimhaut der Luftröhre geht in dem Kehlkopfe in ein sehr elastisches Gewebe über, das von der Vorderkante des Schildknorpels in zwei halbkreisförmigen Abtheilungen, die man Stimmbänder nennt, sich nach hinten zu den Gießkannenknorpeln zieht. Dieselben sind jedoch keine

Hautfalten, wie man sich gewöhnlich vorstellt, sondern bestehen aus wulstförmigen Muskelmassen, die nach dem halbkreisförmigen Rande hin dicker werden und durch einen Ueberzug von elastischem Gewebe eine keilförmg zulaufende Gestalt haben; gerade dieser Ueberzug bildet die dünnen, scharfen, geradlinigen Ränder, welche die Vergleichung mit Membranen nahelegen. Ueber das Verhalten der Stimmbänder bei der Stimmbildung u. s. w. haben Untersuchungen mit dem *Kehlkopfspiegel* oder *Laryngoskop* (Manuel Garcia 1855, Czermak 1858) Aufschlüsse gegeben, die ältere Ansichten als unrichtig erwiesen; man sah, daß bei gewöhnlichem Athmen die Ränder der Stimmbänder weit voneinander abgebogen sind, also die *Stimmritze weit* geöffnet ist, daß aber bei der Tonbildung die Stimmritze als ein schmaler geradliniger Spalt wirkt, dessen Weite bei hohen und tiefen Tönen keine Verschiedenheit darbietet. Carl Müller (1877) hat nun solche keilförmige Membrane aus Kautschuk in Halbkreisform befestigt und zwar theils an nachgiebigen Kautschukröhren, theils festgespannt, und dieselben durch Anblasen zu Tönen erregt, die denen der Menschenstimme gleichen. Aus diesen Versuchen wird es wahrscheinlich, daß die tiefen Baßtöne durch das Schwingen der ganzen Stimmbänder, ihrer Befestigungsknorpel und eines Theiles der Luftröhre entstehen, da bei solchen Tönen alle Theile gleich schwach gespannt sind und so die langsam schwingende Bewegung annehmen. Bei höheren Tönen spannen sich die Knorpel stärker, die Stimmbänder erhalten eine feste Begrenzung und eine mehr oder weniger starke Spannung, wodurch dieselben fast nach den Gesetzen der Membrane schwingen und hierdurch, wie schon Joh. Müller erkannte, die Verschiedenheit der Tonhöhe bewirken. Bei den Fisteltönen der Kopfstimme ist nach laryngoskopischen Beobachtungen die Halbkreisform der Bänder am schärfsten hergestellt, sie scheinen nach C. Müller einer gleich dicken Haut ähnlicher zu werden, völlig nach den Membranregeln zu schwingen und daher leicht in Partialschwingungen zu gerathen, wie dies für Halbkreismembrane durch Versuche nachgewiesen ist. Savart (1825) und nach ihm Masson (1861) erklären das menschliche Stimmorgan für eine Lippenpfeife, dem Jägerpfeifchen mit seinem Ventrikulum vergleichbar; die Stimmbänder sollen nur den Windspalt und der gewölbte Hohlraum zwischen ihnen und den sogenannten falschen Stimmbändern das Ventrikel bilden.

253 **Singende Flammen** oder die chemische Harmonica (Higgins 1777; Chladni 1800). Wird über die Flamme irgend eines Gases oder Dampfes eine Röhre gehalten, so daß die Flamme im Innern der Röhre brennt, so entsteht ein Ton, den man die chemische Harmonica nennt; am leichtesten sprechen Röhren über Wasserstoff- oder Leuchtgasflammen an. *Die Höhe des Tones* folgt ganz dem Gesetze für offene Pfeifen; sie ist also *umgekehrt proportional der Länge der Röhre, aber unabhängig von der Weite und dem Stoffe derselben*; einen geringen Einfluß üben die Temperatur und die Größe der Flamme und andere Umstände. Außer dem Grundtone der betreffenden Röhre kann die Flamme auch noch die höheren Obertöne derselben geben, wenn man sie immer mehr verkürzt; Tyndall erhielt von einer Röhre die vier ersten Obertöne. Eine noch eben schweigende Flamme hüpft und singt, wenn ein Ton angegeben wird, der fast im Einklange mit dem Röhrentone ist; eine singende Flamme hüpft, verlischt und schweigt, wenn ein Ton erregt wird, der nicht ganz mit dem Flammentone im Einklang ist (Versuche von Graf Schaffgotsch 1857 und von Tyndall 1857). Das Gehorchen der Flamme im Singen und Schweigen ist am vollkommensten, wenn sich dieselbe ein wenig entfernt von dem „besten" Orte, d. i. von der Stelle befindet, an der sie am stärksten singt; das Auslöschen gelingt um so besser, je kleiner das Flämmchen ist, und je näher und stärker der äußere Ton erklingt. Verwandt sind die *sensitiven* oder *empfindlichen Flammen*, d. h. solche freie Flammen, welche durch hohen Druck im ausströmenden Gase dem Flackern nahe sind; solche Flammen gerathen durch Töne in hüpfendes Zucken (Leconte 1858), theilen sich, wenn sie breit sind, in Zacken, verkürzen oder verlängern sich, wenn sie von einem voll geöffneten Rundbrenner herrühren (Barret 1867), ja ändern durch das leiseste Geräusch ihre Gestalt; auch Rauch- und Flüssigkeitsstrahlen verhalten sich ähnlich (Tyndall 1868).

Um die Erscheinungen der singenden Flammen erklären zu können, hat man nach dem Vorgange Wheatstones (1834) optische Analysen der singenden Flammen vorgenommen. Man kam nämlich wegen des Zuckens der singenden Flammen auf den Gedanken, dieselben

seien discontinuirlich; man dachte sich, der durch die Wärme beschleunigte Luftstrom in der Röhre verlösche die Flamme, mische sich aber in dem folgenden Moment mit dem ausströmenden Gase und erzeuge so ein leicht entzündliches Knallgas, zu dessen Wiederaufflammen die noch vorhandene Hitze ausreiche, und so eine ganz kleine Explosion hervorrufe; es sollte also der Ton durch zahlreiche Explosionen oder Luftstöße seine Erklärung finden, und die singende Flamme sollte jeden Augenblick verlöschen und neu wieder aufglühen. Daß wir bei gewöhnlichem Zuschauen von dem Verlöschen nichts merken, erklärte man aus der Dauer des Lichteindruckes auf unsere Netzhaut, welche Dauer über die kurze dunkle Zwischenzeit hinüberreiche. In dieser Ansicht wurde man durch die optische Analyse der singenden Flammen bestärkt, bei welcher man darauf ausgeht, das Augenbild der Flamme jeden Moment auf eine andere Stelle der Netzhaut zu bringen. Dies kann schon dadurch geschehen, daß man während des Betrachtens der Flamme mit blosem Auge oder durch einen Operngucker den Kopf verschiebt oder die Flamme selbst rasch zur Seite bewegt. Am deutlichsten geschieht es durch einen kleinen stark convexen Spiegel, der ein verkleinertes Flammenbild erzeugt und schief an einer Walze sitzt, also mit dieser rotirt; in einem solchen Spiegel muß das Bild der Flamme jeden Augenblick eine etwas andere Stellung einnehmen, weil der Spiegel ja selbst jeden Augenblick seine Richtung verändert; und da die Veränderung kreisförmig geschieht, so müssen auch die unendlich vielen Spiegelbilder der Flamme in einem Kreise stehen. Ist die Flamme ununterbrochen, so muß auch an jeder Stelle dieses Kreises ein Flammenbild stehen und alle diese Bilder müssen zusammen einen feurigen, ununterbrochenen Kreis bilden, weil die Eindrücke der ersten Bilder noch im Auge haften, wenn die der letzten Bilder im Kreise schon hervorgerufen sind. Ist aber die Flamme discontinuirlich, in sehr raschem Wechsel bald erloschen, bald neu entzündet, so können nicht an allen Stellen des Bildkreises Flammenbilder stehen; der feurige Kreis ist nicht zusammenhängend, sondern besteht aus deutlich getrennten Funken. Einen solchen Kreis feuriger Perlen sieht man aber, wenn sich in dem beschriebenen, gedrehten Spiegel eine singende Flamme spiegelt; folglich ist diese Flamme discontinuirlich, sie verlischt jeden Augenblick, um sofort wieder aufzuglühen. Diese optische Analyse der singenden Flammen spricht folglich sehr für die Erklärung des Tones durch kleine Explosionen; auch war diese Ansicht am meisten verbreitet und wird von dem großen Namen Faraday getragen. Gegen dieselbe wird besonders der Versuch von Rijke (1859) angeführt, daß eine Röhre auch durch ein glühendes Drahtnetz zum Tönen gebracht werden kann; außerdem ist nach derselben nicht erklärlich, daß die Zeit zwischen zwei Explosionen, wie es nach der Wellentheorie sein muß, sich so genau an die Zeit für eine Longitudinalwelle der Luftsäule in der Glasröhre anschmiegt. Aus diesen und anderen Gründen gibt es noch mehrere Erklärungsweisen. So meint Tyndall, daß durch die Reibung des Luftstromes an der Flamme (siehe 254.) ein Geschwirre von Bewegungen entstehe, von denen leicht eine den für die Röhre passenden Rhythmus besitzen und daher die Luftsäule in stehende Wellen versetzen könne, welche alsdann auf die Flamme in ähnlicher Weise zurückwirken dürften, wie die Wellen in einer Zungenpfeife auf die Zunge. Schrötter sieht die Ursache des Tones in einem von ihm beobachteten Zurückschlagen und Wiederaufsteigen der Flamme, was durch wechselnde Verdünnung und Verdichtung des Gasstromes hervorgerufen werde; Grailich und Weiß (1858) sehen die Stoffänderungen, die durch die Verbrennung entstehen, als die Ursache von Unruhen um die Flamme herum an, welche die Schw. anregen. Sondhauß (1860) sucht die Oscillationen schon in dem Ausflußrohre, welche durch Stöße die Luft in dem Klangrohre in Schwingungen versetzen müßten. Nach Terquem (1868) bringt der Luftstrom Aenderungen an der Flamme hervor, die ein ungleichmäßiges Einströmen der Luft zur Folge haben; dadurch entständen Schw., die an dem Ende der Röhre reflectirt würden und mit neuen zu stehenden Wellen interferiren müßten; diese stehenden Wellen brächten dann auch Flackern der Flamme hervor. Es sind also über diesen Gegenstand die Acten noch nicht geschlossen.

Interessante Erscheinungen treten beim Zusammenwirken zweier Flammen in einer Röhre auf. Läßt man eine Flamme gegen die andere reiben, so können verschiedene musikalische Töne entstehen, von denen einzelne einer Trompete, andere denen einer Lerche gleichen (Tyndall 1869). In manchen Fällen regen die Flammen einander an. Mauritius (1873) brachte in eine Röhre 2 Flammen, von denen die eine von oben herab brannte; dieselbe gerieth in die höchste Unruhe, wenn die zweite von unten genähert und eingeschoben wurde; sie gab abwechselnd die Obertöne, bis sie auf dem Grundtone gleichzeitig mit der unteren tönend zur Ruhe kam. Dieses gegenseitige Anregen beider Flammen findet selbst statt, wenn keine von beiden für sich durch irgend ein Mittel zum Tönen zu bringen ist. Kastner (1873) beobachtete, daß zwei neben einander in einer Röhre brennende und tönende Flammen schweigen, wenn man sie einander bis zur Berührung nähert; er gründete darauf ein Instrument, Pyrophon genannt, in welchem beim Niederdrücken einer Taste irgend eines von den zahlreichen Röhrenflammenpaaren getrennt und dadurch zum Tönen gebracht wird; der Klang des Instrumentes soll dem der Menschenstimme sehr ähnlich sein. — Indessen

können zwei Flammen auch ohne Röhre Töne erzeugen. Kundt beobachtete 1866, daß zwei aus Spitzen austretende Windströme oder zwei Leuchtgasflammen einen Ton hervorbringen, wenn sie mit ihren Spitzen zusammenstoßen; später meinte Decharme irriger Weise, es müsse ein Luft- oder Sauerstoffstrom gegen eine Gasflamme treffen. Noack fand 1882, daß zwei senkrecht einander treffende Gasflammen, z. B. eine horizontale und eine vertikale, den Violinklängen ähnliche Töne erzeugen, welches auch die Lage der Berührungsstelle sein möge; zuerst ergab sich, daß bei constantem Gasdrucke die Tonhöhe direct proportional zur Länge der vertikalen und umgekehrt proportional zur Länge der horizontalen Flamme ist, beide gemessen von der Brennermündung bis zur Kreuzungsstelle; später (1883) stellte sich heraus, daß von einer gewissen Kreuzungsstelle an sich das Verhältniß umkehre, was dem Forscher darauf hinzuweisen scheint, daß in dem einen Falle die verticale, im anderen die horizontale Flamme töne; er hat nun auch die Gesetze dieses kritischen Punktes, der Umschlagstelle untersucht und gefunden, daß die Umschlagstellen auf Parabeln liegen, deren Abscissen die horizontalen und deren Ordinaten die vertikalen Flammenlängen sind. Besonderes Interesse bietet die Erscheinung dadurch, daß man mit den zwei Flammen in rascher Folge alle Töne zwischen der oberen und unteren Grenze der Hörbarkeit hervorbringen und die Verschiedenheit der oberen Grenze für verschiedene Ohren leicht darthun kann, indem die höchsten Töne sich durch besondere Reinheit auszeichnen.

Barret (1872) hat eine Einrichtung zur leichten Bildung empfindlicher Flammen ohne Drucksteigerung angegeben; über einen Ring, welcher etwa 4″ oberhalb eines Speckstein-brenners angebracht ist, wird ein feines Drahtnetz gezogen und das Gas über demselben entzündet. Diese etwa 4″ hohe Flamme ist nicht blos höchst sensibel, sondern kann auch nach Geyer leicht singend und schweigend gemacht werden. Besonders empfindlich ist sie, wenn man auf das Drahtnetz eine mäßig weite Röhre leicht über die Flamme setzt. Hebt man das Netz mit der Röhre, so verkleinert und verdunkelt sich die Flamme, fängt aber an, mit gleichmäßigem, lautem Tone zu singen. Geht man mit dem Netze wieder so weit herab, daß die Flamme eben schweigt, so fängt sie bei jedem Geräusche an zu singen, hört aber auch mit diesem auf. Rückt man die singende Flamme etwas zur Seite, bis sie die Röhrenwand berührt, so wird der Ton etwas tiefer, schweigt aber bei jedem fremden Geräusche, und klingt fort, wenn diese verstummen. Ridout hat (1877) eine sensitive Flamme hergestellt, die sich durch einen Ton in 2 Flammen theilte, und Barret eine solche, die durch den unhörbar hohen Ton einer Galton'schen Pfeife auf 1/3 ihrer Länge einschrumpfte. Nach Neyreneuf (1883) läßt sich auch mit einem Bunsen'schen Gasbrenner eine empfindliche Flamme herstellen, indem man dessen Luftlöcher verschließt und durch Drehen des Hahnes die Gasausströmung mäßigt, bis sich die Flamme in zwei Theile zerlegt, eine äußere bleiche und eine innere zurückschlagende. Wird die Erhitzung des Rohres dadurch vermieden, daß zwischen ihm und einem Mantel ein Wasserstrom durchgeht, und ein Druckregulator in die Gasleitung geschaltet, so erhält man eine constant empfindliche Flamme, mit welcher N. (1883) die Schall-Leitung der Gase untersuchte.

Lord Rayleigh gab (1878) für die singenden Flammen und andere Luftwärmetöne folgende Erklärung: Wenn auf ein schwingendes Pendel im Augenblicke des Ganges durch die Gleichgewichtslage eine Kraft wirkt, so wird seine Amplitude größer oder kleiner, während die Schwingungszeit dieselbe bleibt; wird aber nach 1/4 der Doppelschwingungsperiode, also im Augenblicke der größten Elongation eine Kraft ausgeübt, so wird die Amplitude nicht geändert, wohl aber die Schwingungszeit. Gleiches gilt für die Wärme, die schwingender Luft zugeführt wird; findet die Zuführung in Momente der größten Verdichtung oder Verdünnung statt, so wird die Schw. stärker oder schwächer; geschieht sie aber 1/4 der Periode vor oder nach der größten Verdichtung, so wird die Schw. nicht verstärkt, aber die Tonhöhe gesteigert oder vermindert. Hiermit erklären sich zunächst die Töne der Sondhauß'schen (1850) Kugelröhrchen, kleiner Glasröhrchen mit angeblasenen Kugeln, die beim Erwärmen der Kugel einen bisher nicht befriedigend erklärten Ton erzeugen. Die größte Verdichtung entsteht in der Kugel und im benachbarten Röhrentheile durch Strömen der Luft vom offenen kälteren Theile nach der Kugel; diese Strömung ist in 1/4 der Periode vor der Verdichtung am heftigsten, dauert aber auch noch während der größten Verdichtung selbst fort; also empfängt die zuströmende kalte Luft Wärme während der größten Verdichtung, und dieser Empfang dauert über den Maximalzeitpunkt fort, weil die Wärme der Glaswände nicht plötzlich auf die Luft übergeht, diese also noch eine niedigere Temperatur behält. Da also die Luft während der Verdichtung Wärme empfängt, wird ihre Schw. verstärkt; ebenso wirkt die Wärmeabgabe bei der Verdünnung. Entgegengesetzt wäre die Wirkung, wenn die Erwärmung am offenen Ende stattfände; bei der größten Verdichtung würde dann Wärme abgegeben, bei der größten Verdünnung aufgenommen, die Schw. würden geschwächt, aufgehoben. — Bei dem Rijke'schen Versuche tönt die Röhre nur kurze Zeit, wenn das Netz durch eine Gasflamme erwärmt wurde, dagegen lange, wenn es durch einen elek-

trischen Strom in glühendem Zustande bleibt; die unten einströmende, über dem Netze verdünnte Luft empfängt dann immer im Zustande größter Verdichtung Wärme, wodurch sie die Schw. erhält. Nach Bosscha und Rieß (1859) tönt ein kalt gehaltenes Netz im oberen Theil der Röhre, wenn ihm warme Luft von unten zugeführt wird; es findet dann Wärmeabfuhr im Verdünnungszustande statt, was ebenfalls die Schw. verstärkt. An den Enden kann die Wirkung nicht stattfinden, weil hier Verdichtung oder Verdünnung fehlen, und in der Mitte, am Knoten nicht, weil hier keine Schwingungsverstärkung möglich ist, also am Besten in der Mitte zwischen den ungünstigsten Stellen, in $1/4$ der Länge unten oder oben. In diesen Erklärungen ist nur von Verstärkung der Schw. und nicht von ihrer Entstehung die Rede, weil bei solchen Luftströmen unendlich kleine Schw. jeder Art entstehen, aber nur diejenigen zur Tonbildung heranwachsen, die verstärkt werden und hierdurch erhalten bleiben. Bei den singenden Flammen bildet Rayleigh die *Sondhauß'sche Erklärung* (1860) nur weiter aus; er führt für diese an, daß die Zuckungen der Flammen ganz dieselben bleiben, wenn in dem Gaszuflußrohre ein Bällchen Baumwolle steckt, während der Ton alsdann durchaus nicht entsteht; weiter führt er an, daß der Ton leicht anspricht, wenn die Länge des Zuflußrohres weniger als $1/4$ der Wellenlänge des Wasserstofftones beträgt, aber nicht wenn sie $1/4$ bis $2/4$ dieser Länge erreicht, jedoch wieder, wenn sie über $2/4$ aber unter $3/4$ liegt u. s. w. Aus diesen schon von Sondhauß festgestellten Thatsachen folgt, daß die Zuflußröhre von entscheidender Bedeutung bei den singenden Flammen ist; R. fügt noch einen Versuch bei, der beweist, daß die Wellenbildung in jener Röhre stattfindet; er hielt einen kugelförmigen Resonator entfernt über die Wasserstoffflamme; da der Ton auch so entstand, so ist damit gezeigt, daß die Wellenbildung in unendlicher Kleinheit schon in der Zuflußröhre stattfindet, und daß die eigentlich tönende Röhre aus dem Geschwirre von Schw. diejenigen zum Tönen verstärkt, auf die sie abgestimmt ist. Ein solches Geschwirre von Schw. muß natürlich ebensowohl in der Zuflußröhre stattfinden, als nach dem Einführen der Flamme in die singende oder Resonator-Röhre. Wenn nun die Länge der Zuflußröhre $1/4$ der Wellenlänge des Wasserstofftones ist, so entsteht am Brenner ein Knoten, der höchste Druck in der Zuflußröhre fällt mit dem im Resonator am Brenner zusammen, das Ausströmen von Gas und die Wärmebildung desselben bleiben unverändert, es entsteht kein Ton. Hat aber die Zuflußröhre eine geringere Länge, so findet die stärkste Gasausströmung um $1/4$ Periode vor der größten Verdichtung statt; fiele nun die stärkste Entwickelung von Wärme absolut genau mit der stärksten Ausströmung zusammen, so würde die Wärmezufuhr $1/4$ vor der Periode derselben geschehen, die Schw. würden nicht verstärkt; es wird aber jedenfalls eine Verzögerung der Wärmebildung stattfinden, weil die Verbrennung nur an der Außenfläche des Gasstromes geschieht; diese Verzögerung mag noch so unbedeutend sein, $1/4$ der so sehr kleinen Schwingungsdauer kann sie leicht betragen, wodurch die Wärmezufuhr ganz oder nahe auf die stärkste Verdichtung fällt und hiermit die Schw. verstärkt werden. — Auch Bresina kam 1881 zu einer ähnlichen Theorie.

254 **Weniger wichtige Tonquellen.** 1. *Drehende Schwingungen der Stäbe.* Werden glatte Glas-, Holz- oder Metallstäbe mit einem feuchten oder beharzten Lappen in kreisförmigen Bahnen gerieben, so entsteht ein Ton, dessen Schwz. 0,6 von derjenigen des Longitudinaltones beträgt, der also etwa eine Sexte tiefer ist als dieser. — 2. *Reibungstöne.* Die Reibung besteht in dem Stoßen der Theilchen eines Körpers gegen die hervorragenden Theilchen eines anderen Körpers, an welchem der erste sehr nahe vorbeigeht; meistens sind die Hervorragungen ungleich, folglich sind auch die Stöße verschieden, und es entsteht ein Geschwirre von Bewegungen, die das Reibungsgeräusch bilden; dasselbe wird nur dann zu einem erkennbaren Tone, wenn der eine Körper durch die Elasticität des anderen in regelmäßigen Pausen zurückgeworfen wird und nach jeder Pause einen gleichmäßigen Stoß auf denselben ausübt; folgen diese Stöße nicht sehr schnell, wie z. B. wenn ein Stück Kreide unter stumpfem Winkel bei nicht allzustarkem Drucke auf einer Tafel vorangestoßen wird, wobei die einzelnen Stöße durch eine punktirte weiße Linie zu erkennen sind, so entsteht kein Ton; erfolgen aber bei stärkerem Drucke die Stöße sehr schnell, so entsteht der bekannte, schrille Ton, dessen Figurenbild, die Kreidelinie, leicht als aus schmalen Streifen zusammengesetzt erkannt werden kann. In derselben Weise entstehen Töne, wenn man mit befeuchteten Finger fest über eine Fensterscheibe fährt, oder mit benetztem Kork über eine Glasscheibe, oder mit einem Nagel, einem Messer über eine harte Platte, oder mit einem Diamant über eine Glastafel; in den letzten Fällen graben die Töne ihr Bild in Form von Linien in die Platte ein, welche aus feinen Rillen zusammengesetzt sind, wie Kraß und Landois (1873) durch mikroskopische Untersuchungen gefunden haben; die Zahl der Rillen läßt auch di Schwzn. dieser *Schrilltöne* erkennen. Dieselben Schrilltöne treten auch ein bei Bewegungen in ungeölten Maschinen, Pumpen, Thüren, beim Bremsen von Bahnzügen. Allein auch das Geschwirre des Reibungsgeräusches enthält jedenfalls einzelne bestimmte Töne, die man z. B. beim Fahren in einem Bahnzuge mit einiger Aufmerksamkeit oder mit bewaffnetem Ohre hören kann; im letzten Falle hört man selbst im Tagesgeräusche Töne. Eine

Flintenkugel erzeugt durch Reibung an der Luft, der Wind durch Reibung an den Bäumen, ein rasch bewegtes Licht durch Reibung an der Luft Töne, ein Luftstrom durch Reibung an dem scharfen Rande eines Messers, an den Kanten eines schmalen Spaltes, an der Mündung eines Schlüssels oder an der Lippe einer Pfeife einen Ton oder ein Tongeschwirre. Enthält das Tongeschwirre den Ton einer ganz nahen Röhre, so muß dieselbe tönen, weil jener Ton die Luftsäule der Röhre in stehende Schw. versetzt; ein anderer Ton kann dies nicht vollbringen, weil die von demselben erzeugte Verdichtung bei ihrer Rückkehr durch eine Verdünnung aufgehoben wird. In dieser Weise erklärt Tyndall die Tonbildung in Lippenpfeifen und in der chemischen Harmonica. Die Frankfurter Gitterbrücke tönt, wenn in ihrer Nähe geschossen wird; Telegraphendrähte tönen durch leichten Wind, wie ein Stab, eine Degenklinge, eine Peitsche beim raschen Durchschneiden der Luft einen Ton erzeugt. Strouhal hat (1878) diese *Luftreibungstöne* genauer untersucht (246.); dieselben entstehen hiernach durch Verdichtung der Luft vor dem bewegten Körper und Verdünnung hinter demselben; die Reibung verhindert die Ausgleichung dieser Druckdifferenz, bis diese so groß geworden ist, daß sie die Reibung überwindet; hierdurch entsteht ein Losreißen der Luft von der Verdichtung nach der Verdünnung hin, ein schwacher Luftstoß, dessen unaufhörliche Wiederholung den Ton bildet. — 3. *Töne von Flüssigkeiten.* Die Sirene tönt auch im Wasser; Cagniard-Latour brachte Flüssigkeitsäulen, die in Glasröhren eingeschlossen waren, dadurch zum Tönen, daß er die Glasröhren longitudinal rieb. Wertheim blies eine im Wasser liegende offene Labialpfeife mit Wasser an und erhielt neben dem Grundtone die 5 ersten harmonischen Obertöne; die Schwz. des Grundtones entsprach der Fl. $n = c/2l$, worin aber c nicht gleich der vollen Geschw. des Schalles im Wasser $= 1424^m$ ist, sondern nur $= 1424 . \sqrt{2/3}$. Diese Verringerung erklärte Wertheim daraus, daß durch einen Druck auf eine Flüssigkeitsäule, wie auf einen Stab, eine Volumenveränderung und dadurch eine Aenderung der Dichtigkeit stattfinde; hierdurch ändere sich auch c nach der Fl. $c = \sqrt{(e/d)}$, welche Veränderung nach Wertheims Versuchen durch Multiplication mit $\sqrt{2/3}$ ausgedrückt wird. Aus der Fl. für n folgt demgemäß, daß der Grundton der Wasserpfeife 3mal soviel Schw. hat als derjenige einer Luftpfeife von gleicher Länge. Es wurde schon (249.) angegeben, daß Helmholtz diese Erklärung von Wertheim bestreitet und daß Kundt die Helmholtz'sche Erklärung bestätigt. Das entgegengesetzte Verhalten zeigen die Ausflußtöne von Savart und Sondhauß. Der erstere bemerkte eigenthümliche, weiche Töne beim Ausfließen von Wasser aus kurzen Ansatzröhrchen von gefüllten Gefäßen und fand die Schwz. der Wurzel aus der Druckhöhe und umgekehrt der Weite der Röhrchen proportional. Aehnliches fand Sondhauß, als er Wasser oder Luft durch eine Oeffnung in einer dünnen Wand strömen und den Strahl in einiger Entfernung durch eine congruente Oeffnung gehen ließ; die Wasser- und Luftstrahlen geriethen dann durch Reibung an den Oeffnungen in Schw.; doch zeigten sich hier die Wassertöne tiefer und schwächer als die Lufttöne. — 4. *Töne durch Wärme.* Trevelyans Wackler, siehe 237. Rijkes Drahtnetz 253. Sondhauß' Kugelröhrchen 253. Die durch Erwärmen von Flüssigkeiten aufsteigenden Luftbläschen erzeugen einen Ton. Reisende, z. B. Reuleaux berichten von orgelartigen Tönen in Thälern; nach Sorel (1883) entstehen dieselben durch Reibung des Windes an einer Bergkante, wobei das Thal die Resonanz bildet. Memnons Säule (?). — 5. *Elektromagnetische Töne.* Wird um einen Stab von weichem Eisen ein Draht in vielfachen Windungen geleitet, so entsteht in dem Stabe der Longitudinalton, wenn in dem Drahte ein elektrischer Strom geschlossen oder geöffnet wird. Auch in Röhren von Eisenblech, die um den Draht gelegt sind, entstehen Töne; Röhren von anderen Metallen tönen, wenn dieselben der Länge nach einen Schnitt haben, dessen Ränder sich berühren. — 6. Der *Brummkreiselton* entsteht dadurch, daß die Luft in dem Kreisel mit demselben rotirt und vermöge ihrer Centrifugalkraft an der Seite der Oeffnung, nach welcher sie strömt, austritt, daß aber dann an der anderen Seite Luft einströmt, die das Luftvolumen anbläst. Der Ton ist um so tiefer, je größer das Luftvolumen, je kleiner die Oeffnung und je dicker (beim Holzkreisel) die Wand ist. Der Brummton der Ventilatoren und der Dampfausblaserohre. — 7. *Der Dampfpfeifenton.* Wird der Dampf mittels des Hahnes a (Fig. 158) in den Hohlkugelraum b gelassen, so strömt er durch den schmalen ringförmigen Spalt zwischen dem Rande c der Hohlkugel und dem Rande d einer kreisförmigen, diese halbe Hohlkugel fast zudeckenden Scheibe aus und trifft dann auf die scharfe Schneide der Glocke g; die hierdurch erzeugten Schw. der Glocke geben den durchdringenden schrillen Ton. — 8. *Insectentöne.* Nur wenige Insecten haben Stimmen: die Maikäfer haben in ihrem Tracheen-

Fig. 158.

verschluß eine Zunge, die Immen und Fliegen ein Häutchen, die Cycaden in einer Bauchtrommel zwei Häutchen, welche durch Luftströme zum Tönen kommen. Oefter findet sich Tonerzeugung durch Reibung: das Heimchen reibt seine Deckflügel an einander, die Feldheuschrecke reibt ihre gezahnten Hinterschenkel über eine Leiste der Flügeldecke, die Bockkäfer reiben die innere Randkante der Vorderbrust, indem sie sich fortwährend bücken, über einen Fortsatz der Mittelbrust; die geriebene Stelle enthält nach Kraß und Landois (1873) Rillen, wodurch sich die Entstehung dieser Schrilltöne erklärt. Die Zahl der Rillen auf einer gewissen Strecke und der Reibungsstriche auf denselben läßt die Schwz. berechnen; so enthält der Ton des männlichen Moschusbocks 2141 Schw. Fliegen, Mücken, Bienen u. A. erzeugen auch einen Flugton.

9. **Töne durch Strahlung, Radiophonie.** Als Graham Bell und Tainter (1880) ihre Erfindung des Photophons (s. 535. 12) weiter verfolgten, entdeckten sie auch, daß alle Körper durch intermittirende Belichtung zum Tönen gebracht werden können. Eine solche häufig unterbrochene Bestrahlung kann z. B. durch eine rasch gedrehte Scheibe bewirkt werden, die an ihrem Umfange Oeffnungen trägt, auf welche Sonnenlicht oder irgend ein anderes starkes, durch eine Linse concentrirtes Licht fällt. Auf der anderen Seite der Scheibe werden die Strahlen durch eine zweite Linse parallel gerichtet und auf den Empfänger geleitet; anfänglich war derselbe ein ans Ohr gehaltenes Ebonitplättchen, das durch die intermittirende Bestrahlung einen deutlich hörbaren Ton entwickelte; Plättchen von anderen Stoffen gaben schwächere Töne. Später benutzten die Entdecker ein Hörröhrchen, in welches dünne Scheibchen beliebiger Stoffe eingesetzt wurden; ja auch die Luft des Hörrohrs allein wurde durch die intermittirende Bestrahlung zum Tönen gebracht. Röntgen füllte ein längeres, weiteres Glasrohr mit verschiedenen Gasen, verschloß dasselbe mit Steinsalzplatten, durch welche die intermittirende Belichtung eindrang, und fand, daß die Töne bei den Gasen am stärksten sind, die am besten die Wärmestrahlen absorbiren, was Tyndall für viele Gase und Dämpfe bestätigte. Mercadier beobachtete, daß Höhe und Klang des Tones nur wenig von dem Stoffe und den Dimensionen des Empfängers abhängen, daß dagegen die Geschw. der Drehung des unterbrechenden Rades einen wesentlichen Einfluß übt und daß die dunkeln Wärmestrahlen und die rothen Lichtstrahlen am kräftigsten wirken. Schließlich (1881) fanden die Entdecker, daß lockere, dunkle Körper, die bekanntlich Wärmestrahlen am kräftigsten absorbiren, auch die besten Empfänger sind, und daß der Ruß im einen wie im andern alle Körper übertrifft. Als sie einen inwendig mit Ruß bedeckten Resonator der intermittirenden Bestrahlung aussetzten, gab derselbe bei sehr schneller Rotation der Lichtscheibe nur einen schwachen Ton, der an Höhe ab und an Stärke zunahm, als die Geschw. der Drehung vermindert wurde und endlich, nachdem er mit dem Eigentone des Resonators zusammengefallen war, eine solche Stärke erreichte, daß er einem großen Auditorium hörbar wurde. Bell erklärt die Entstehung der Töne durch die Ausdehnung der Theilchen bei der Bestrahlung und ihre Zusammenziehung bei dem sogleich eintretenden Mangel derselben; Ruß, der die Wärme stark absorbirt, zeigt daher auch die stärkste Wirkung; hier und bei anderen lockeren Körpern wirke indeß noch die Luft zwischen den Theilchen mit, indem dieselbe nicht blos durch die Ausdehnung der Theilchen zusammengedrückt, sondern auch selbst abwechselnd erwärmt und abgekühlt werde. Jedoch neigen die meisten Forscher dahin, den durch die Absorption der Strahlen gesteigerten Molekulardruck als Ursache des Tönens anzunehmen, und Mercadier hält die Lufthaut für den eigentlichen Empfänger. Man unterscheidet jetzt (1884) nach der Gattung der Strahlen Thermophonie, Photophonie und Actinophonie.

255 **Das Mittönen** (Savart 1837). Die Resonatoren (Helmholtz 1863). Unter dem Mittönen versteht man die Erscheinung, daß ein tönender Körper einen ruhenden zum selbständigen Tönen anregen kann. Wie sich nämlich die Schallschwingungen eines Körpers auf die ihn umgebende Luft übertragen, so theilen sie sich auch anderen Körpern mit, die mit dem tönenden Körper in Verbindung stehen, und so theilt auch die schwingende Luft ihre Tonbewegung den Körpern mit, welche sie berührt. Sind solche Körper begrenzt, so können die an den Grenzen reflectirten Wellen mit neu voranschreitenden zu stehenden Wellen interferiren, wodurch selbständiges Tönen entsteht. Dies kann sowohl durch einen einzelnen Ton wie auch durch ein Tongemisch stattfinden. Ein Tongemisch kann einen Körper nur dann zum Mittönen bewegen, wenn einer der Theiltöne des Tongemisches in seiner Tonhöhe oder Schwingungsdauer übereinstimmt mit einem der Töne, die der Körper bei selbständigem Tönen vermöge seiner Dimensionen und seiner Elasticität entwickeln kann.

Beweis. Wenn die Schallschw. eines Theilchens, die bekanntlich viel größer und

massiger als die Licht- und Wärmeschw. sind, nicht in einem anderen Theilchen Schw. von gleicher Dauer hervorrufen können, so kann überhaupt keine Tonübertragung stattfinden, die Bewegung wird dann wohl meist in Wärme verwandelt. Denn würde das zweite Theilchen schneller als das erste schwingen, so wäre es schon auf dem Rückwege, wenn das erste Theilchen noch vorangeht, und durch Aufeinanderstoßen der Theilchen würde die große Schallschw. in kleinste Erzitterungen verwandelt; wäre die Bewegung des zweiten Theilchens die langsamere, so wäre dasselbe noch auf dem Rückwege, wenn das erste schon wieder vorangeht, und der Erfolg wäre derselbe. Stimmen aber die Perioden beider Theilchen überein, so kann das erste bei jeder Schw. in gleichem Sinne auf das zweite wirken und demselben allmälig eine starke Bewegung verleihen; so können Luftschwingungen feste Körper zum Tönen bringen und Aetherschw. wägbare Körper erwärmen. Ist nun ein Theilchen eines Körpers durch Tonschw. in gleiche Schw. versetzt, so müssen dieselben bekanntermaßen fortschreitende Wellen erzeugen, welche an den Grenzen des Körpers reflectirt werden. Diese reflectirten Wellen können aber mit neu fortschreitenden Wellen nur dann zu tönenden, d. i. stehenden Wellen interferiren, wenn ihre Längen in einfachem Verhältnisse stehen zu dem Wege, den sie von einer Grenze des Körpers bis zur anderen zu durchlaufen haben; denn nur dann sind die Ausgangspunkte der reflectirten Wellen um 1, 2, 3 . . . Wellenlängen von den Anfangspunkten der directen Wellen entfernt, nur dann können also (nach 227.) stehende Wellen entstehen. Ganz dieselben Verhältnisse für die ganz gleichen Schw. finden auch bei dem tonerregenden Körper statt; folglich müssen die beiden Körper in Bezug auf den zu übertragenden Ton gleichgestimmt sein. Indessen ist es hierbei nicht nothwendig, daß der erregende Körper nur dann einen Ton enthalte; vielmehr kann die Schwingungsbewegung desselben eine mannichfach combinirte sein; denn nach Fouriers Gesetz (228.) zerlegt sich eine solche zusammengesetzte Bewegung immer in ihre elementaren Theilbewegungen, und zwar dann, wenn sie auf Körper trifft, die nur diese Theilbewegungen ausführen können. Hieraus folgt: irgend ein Theilton eines Tongemisches regt einen Körper nur zum Mittönen an, wenn derselbe mit irgend einem Eigentone, sei es Grund-, Ober- oder Nebentone des Körpers übereinstimmt.

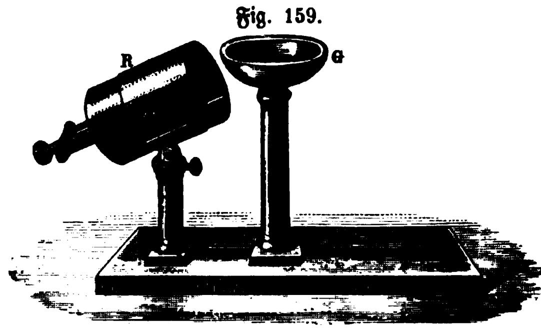
Nachweise. Hat man zwei ganz gleiche Stimmgabeln auf hohlen, offenen Holzkästchen befestigt und streicht die eine an, so tönt die andere mit, selbst wenn sie in größerer Entfernung steht; macht man aber durch Aufkleben eines Stückchens Wachs auf eine Gabel dieselbe ein wenig tiefer, so findet das Mittönen nicht mehr statt. — Singt man gegen ein Klavier oder ein anderes Saiteninstrument einen auf demselben möglichen Ton, so klingt derselbe lebhaft in dem Instrumente nach; daß derselbe von der betreffenden Saite ausgeht, kann man leicht durch Reiterchen sehen oder an dem Erlöschen des Tones bei der Berührung der Saite bemerken. — Hat man auf dem Monochord zwei gleich gestimmte Saiten, so springen Reiter von der einen, wenn die andere tönt, was bei Ungleichheit der Stimmung nicht stattfindet. Nach Krebs (1883) kann eine tiefere Saite eine höhere zum Mittönen anregen, vorausgesetzt, daß der Unterschied der Schwzn. mindestens 2—3, höchstens 3—4 beträgt; die höhere kann aber die tiefere nicht anregen; jedoch ist auch dies möglich, wenn der Unterschied noch nicht 2 beträgt. Läßt man mittels des Steges nur einen Oberton der ersten Saite erklingen, so springen die Reiter von der zweiten Saite wohl an den Bäuchen, aber nicht an den Knoten herab. — Auch Pfeifen, Glocken, Gläser klingen kräftigen Stimmen nach; eine besonders kraftvolle Stimme vermag Gläser entzwei zu schreien. Die hohen Töne der Streichinstrumente bringen Jodstickstoff zur Explosion. — Besonders lehrreich ist der Versuch mit Stimmgabel und Cylinder in 250. — Ist in einem Tongemische ein Ton noch so schwach und dadurch dem Ohre unmerkbar, so erklingt derselbe stark, wenn das Tongemisch auf eine für jenen Ton abgestimmte Luftsäule oder ein anderes Luftvolumen trifft, das direct auf das Ohr wirken kann. Hierauf beruhen die wichtigen Resonatoren von Helmholtz; sie bestehen aus Glas- oder Messingkugeln, die einen kegelförmigen Ansatz von der Form der Mündung des Gehörganges tragen, sowie diesem gegenüber eine größere Oeffnung. Steckt man einen solchen auf einen gewissen Ton abgestimmten Resonator ins Ohr, so hört man den Ton häufig im Tagesgeräusche; ist er aber, wenn auch noch so schwach, in einem erregten Tongemische enthalten, so schmettert er heftig ins Ohr, während er demselben vorher vielleicht unvernehmbar war. Kräftiger wirken die conischen Resonatoren von Appunn.

Die Resonanz (Gebrüder Weber 1825). Unter Resonanz versteht man die **256** Anwendung des Mitschwingens zur Verstärkung schwacher Töne. Töne klingen schwach, wenn der Tonerreger kleine Oberflächen hat, also auch nur eine geringe Luftmenge in Bewegung zu setzen vermag, und wenn der Ton aus dem Tonerreger in ein ganz anderes Medium übergehen muß, wobei die Bewegung an Stärke wesentlich verliert. So klingt eine Stimmgabel für sich allein angeschlagen sehr schwach; Saiten an Bleiklötzen befestigt geben kaum hörbare Töne; dagegen die

Blasinstrumente, in welchen eine große Luftsäule den Ton bildet, haben an sich einen starken Klang. Um nun in jenen Fällen den Ton zu verstärken, verbindet man die Tonerreger mit größeren, trockenen, elastischen Holztafeln, oder auch mit Holzkasten, die eine größere Luftmenge einschließen; es gehen alsdann die Schwingungen des Tonerregers auf die Holztafeln über, dieselben schwingen mit oder resoniren, und setzen wegen ihrer größeren Oberfläche eine größere Luftmenge in Bewegung, wodurch der Ton bedeutend verstärkt wird. Man nennt diese Holztafeln den Resonanzboden; bei der Resonanz von Holzkasten, die man ebenfalls Resonanzböden nennt, wirkt zur Verstärkung des Tones auch wesentlich das eingeschlossene Luftvolumen mit, da dasselbe durch sämmtliche umliegenden Wände in Schwingungen versetzt wird und dieselben leicht an die äußere Luft übertragen kann. Durch das Mitschwingen wird nach der goldenen Regel der Mechanik zwar die Dauer des Tönens verkürzt, die Höhe aber bleibt (nach 225.) unverändert; sonst wäre auch die Anwendung desselben zur Resonanz unmöglich.

Die Resonanz ist sehr nahe verwandt mit dem Mittönen, aber nicht mit demselben identisch; dies geht schon daraus hervor, daß Resonanzböden in demselben Moment schweigen, in welchem der Tonerreger verstummt, während der mittönende Körper in diesem Falle forttönt. Auch liegt darin ein Unterschied, daß ein Resonanzboden für alle Töne resonirt, während der mittönende Körper für seine Töne absolut genau gestimmt sein muß und nur diese resonirt; indessen ist bei Platten ein genaues Abstimmen für das Mittönen ebenfalls nicht unumgänglich, weil Platten (nach 248.) viele Eigentöne haben und daher auch vielfach mittönen können. Aber als Resonanzboden würde doch eine nur mittönende Platte nicht ausreichen, weil sie nur einer beschränkten Zahl von Tönen antwortet, während der Resonanzboden ebenso wie das resonirende Luftvolumen jeden Ton verstärken muß; doch werden auch für höhere Instrumente, wie Violinen, die Resonanzkasten klein und für tiefere, wie Baßgeigen und Pauken, groß gemacht, wie auch die tiefere Pauke größer ist als die höhere. Daß auch die Resonanzkasten eine Art von Abstimmung haben müssen, zeigt ein Versuch mit Savarts (1825) Resonanzapparat, Fig. 159; die mit dem Fiedelbogen angestrichene Glocke G tönt viel stärker, wenn die Röhre R durch Verstellen des verschiebbaren Theils die richtige Länge hat. Wenn also auch die Resonanzkasten einige Verhältnißmäßigkeit zu ihrem Tonumfange haben, so tönen sie doch unweigerlich jedem Tone entgegen; also muß die Resonanz auch in ihrem Wesen vom Mittönen verschieden sein. Nach Weber schwingen die Theilchen eines mittönenden Körpers weiter, weil der mitgetheilte Ton ihnen natürlich, weil der Körper darauf abgestimmt ist; bei resonirenden Körpern aber, deren Theilchen ein bestimmter Ton aufgezwungen wird, hört jede Schw. sogleich auf, dauert also nur fort, wenn und solange die tonerregenden Schw. anhalten und anregen. Durch diese fortwährend erregten Schw. entstehen fortschreitende Wellen, die an den Grenzen nur unvollständig reflectirt und daher wohl von neuen fortschreitenden Wellen aufgehoben werden, ohne diese selbst aufheben zu können; dadurch ist die Bildung neuer reflectirter Wellen möglich, die bei der Rückkehr dasselbe Schicksal haben, aber doch immer neuen Wellen Platz machen, so lange die Tonerregung fortdauert.

Fig. 159.



Nachweise. Verbindet man zwei gleiche Platten durch einen Stab, so entsteht auf der einen dieselbe Resonanzfigur, die sich auf der anderen beim Anstreichen derselben als Klangfigur bildet; sind die zwei Platten von verschiedener Größe und liegen sie in einer Ebene, so entsteht beim Anstreichen der kleineren eine Figur, die man an keiner von beiden für sich allein erhalten kann. — Ist eine Saite als Verlängerung an einer Holzplatte befestigt, so entstehen beim Anstreichen der Saite Resonanzfiguren, die weniger regelmäßig als die Klangfiguren ausfallen; beim senkrechten Striche hüpfen die Sandkörner, beim longitudinalen Tone gleiten sie nur. — Wheatstones unsichtbares Concert. — Zierliche Reso-

nanzfiguren entstehen auf gespannten Membranen, wenn man in der Nähe derselben Stimmgabeln oder Orgelpfeifen zum andauernden Tönen bringt. — Eine kaum hörbare Stimmgabel tönt stark, wenn man sie mit einem Stiele auf einen Tisch oder ein Klavier setzt oder auf einen Resonanzkasten befestigt. — Die Klaviersaiten übertragen durch Stahlstifte, die sie berühren, ihre Schwingungen auf den Steg und durch diesen auf den Resonanzboden; ebenso geschieht die Uebertragung bei Streichinstrumenten; Guitarren klingen schwach, weil der Steg fehlt.

Verschieden vom Mittönen und der Resonanz, aber mit beiden verwandt ist die Erregung der harmonischen Untertöne (Auerbach 1878), deren Schwz. 1/2, 1/3, 1/4 ... von der Schwz. eines Grundtones ist. Setzt man eine stark angeschlagene Stimmgabel so auf eine Tischplatte, daß eine möglichst leise Berührung stattfindet, so hört man in der Ferne die tiefere Octave; mit gewissen Materialien gelingt es auch, die Unterquinte der tieferen Octave, die zweite tiefere Octave u. s. w. herzustellen. Die meisten Stoffe geben auf diese Weise erregt Untertöne, andere, jedoch wenige, wie Glas und Blech, nur Geräusche; dünne polirte Platten der Bergtanne erzeugen allein immer den Ton der Stimmgabel; die deutschen Violinkasten, die in dieser Beziehung untersucht wurden, brachten fast alle solche Untertöne hervor, die italienischen dagegen nicht. Zur Erklärung dieser Erscheinung wird angeführt, daß z. B. eine Resonanzholzplatte unvollkommen elastisch und zähe sei und deßhalb den Bewegungen der aufgesetzten Stimmgabel wohl nach unten, aber nicht augenblicklich nach oben folgen könne; die nächste Schw. der Gabel trifft daher das Holz nicht, wohl aber eine der folgenden, so daß die Platte 2, 3 ... mal weniger Schw. vollbringe als die Gabel.

257 **Das Gehörorgan.** Das Organ des Gehöres gehört ebenfalls in die Betrachtung der Tonerreger, weil ohne dasselbe eine Tonempfindung unmöglich ist, und weil seine Wirkung auf den Gesetzen des Mitschwingens beruht. Das menschliche Gehörorgan besteht aus dem äußeren, mittleren und inneren Ohre. Das äußere Ohr sammelt und leitet mittels der durch vielfache Windungen eine größere Oberfläche darbietenden Ohrmuschel die Schallschwingungen in den Gehörgang, einen etwa 1″ langen Kanal in dem Schläfenbein. Der Gehörgang ist hinten durch das Trommelfell geschlossen, mit welchem das mittlere Ohr oder die Paukenhöhle beginnt, die durch die Eustachische Röhre mit der Rachenhöhle in Verbindung steht, also mit der äußeren Luft communicirt. In der Paukenhöhle liegen die vier Gehörknöchelchen, der an dem Trommelfell befestigte Hammer, an welchen sich der Ambos schließt, der durch das linsenförmige Knöchelchen mit dem Steigbügel in Gelenkverbindung steht. Durch diese Knöchelchen erhalten die Luftschwingungen, welche mittels des Trommelfelles denselben mitgetheilt werden, nach den Gesetzen der Resonanz eine größere Stärke; durch den Verlust des Trommelfelles und der Knöchelchen ist das Gehör nicht aufgehoben, aber bedeutend geschwächt. Die Trommelhöhle ist von dem inneren Ohre, dem sogenannten Labyrinth, das in dem Felsenbeine eine Höhlung bildet, durch eine knöcherne Scheidewand getrennt, in welcher zwei mit Haut überzogene Oeffnungen, das runde und das ovale Fensterchen, eine Verbindung mit der Paukenhöhle herstellen. Der Steigbügel, der sich an das ovale Fensterchen schließt, theilt die Tonschwingungen diesem und dadurch dem Wasser mit, welches das ganze Labyrinth erfüllt und sich schwingend voran- und zurückbewegen kann, weil das ruhende Fensterchen, mit welchem das Labyrinth endigt, auszuweichen vermag. Das Labyrinth besteht aus dem Vorhofe, den drei Bogengängen und der Schnecke; in den beiden ersten Theilen schwimmt in gleicher Form, aber mit geringeren Dimensionen, das häutige Labyrinth, das ebenfalls mit Wasser erfüllt ist; indessen scheidet sich der häutige Vorhof in zwei Säckchen, das runde und das ovale Säckchen, und die häutigen Bogengänge sind an ihrem Beginne angeschwollen, die sogenannten Ampullen. Die Schnecke ist durch eine Scheidewand innerhalb der ganzen Länge des Kanals in zwei Abtheilungen zerlegt, die Vorhoftreppe und die Paukentreppe, von denen die erste am Vorhofe beginnt und die letzte am runden Fensterchen endigt. Die Scheidewand besteht der halben Breite nach aus einem knöchernen Leisten und ist in der äußeren halben Breite eine Membran. Der vom Gehirne kommende Gehörnerv zer-

theilt sich im Labyrinth in mehrere Aeste, von denen Zweige nach den Ampullen und den Säckchen gehen; die Fasern der ersten Zweige durchdringen die Ampullenhaut und vertheilen sich auf der Innenfläche derselben zwischen den Wurzeln steifer, elastischer Haare (Max Schultze), deren Schwingungen hierdurch leicht die Nervenenden reizen können. Die Fasern der Säckchenzweige, die sich ebenfalls auf der Innenfläche der Säckchenhaut vertheilen, sind theilweise von locker liegenden Kryställchen bedeckt, den Hörsteinchen oder Otolithen. Für die Empfindung der Töne ist jedoch nach Helmholtz die Membran der Schneckenscheidewand mit den Corti'schen Bögen bestimmt. Diese Membran ist nämlich doppelt und enthält einen verhältnißmäßig hohen Zwischenraum, die sogenannte Mitteltreppe; die untere Membran (**membrana basilaris**) besteht aus festen radialen Fasern, die an Länge fortwährend zunehmen, und in ihrer Länge viel stärker gespannt sind, als sie in der Breite zusammenhängen; auf diesen Fasern erheben sich die Corti'schen Bögen, schief aufsteigende Stäbchen ebenfalls von verschiedener Länge, nach Kölliker wohl 3000, die an ihrem oberen Ende durch lose kleine Stücke mit absteigenden Platten zusammengelenkt sind, welche gerade bis an den Rand der knöchernen Leiste herabgehen; an oder in diese Corti'schen Bögen treten die Fasern des Hörnervzweiges, welcher der Schnecke zugetheilt ist. Die Fasern der **membrana basilaris**, an Zahl wohl der der Corti'schen Bögen gleich, sind es, welche die Töne percipiren; denn sie sind trotz ihrer Kleinheit auf die gewöhnlichen Töne abgestimmt, da sie mit den Bögen belastet sind. Wegen dieser Belastung und wegen ihrer Breite verhalten sie sich indeß nicht ganz wie Saiten, sondern eher wie stabförmige Platten; sie sind wohl hauptsächlich auf e i n e n Ton, aber auch auf diejenigen Töne abgestimmt, die diesem Grundtone nahe kommen.

Wenn daher ein Tongemisch durch die Schwingungen des Steigbügels und des Labyrinthwassers an die **membrana basilaris** gelangt, so werden von deren Fasern nur diejenigen zum Mitschwingen gebracht, deren Eigenton in dem Tongemische geuau oder nahezu enthalten ist; hierdurch werden diejenigen Fasern der Gehörnerven gereizt, die an die betreffenden Corti'schen Bögen herantreten; dieser Reiz pflanzt sich in das Gehirn fort und erweckt dort einen Eindruck, den wir mit Ton und Tonhöhe bezeichnen. Hieraus ergibt sich das schon von G. S. Ohm (1840) durch Versuche gefundene Gesetz: das menschliche Ohr vermag nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einen einfachen Ton zu empfinden, und zerlegt jede andere periodische Luftbewegung in eine Reihe von pendelartigen Schwingungen und empfindet eine diesen entsprechende Reihe von Tönen. Beginnen und endigen diese Töne zu gleicher Zeit, ohne an Stärke zu wechseln, und stehen sie in einfachem Verhältnisse ihrer Schwingungszahlen zu einander, so daß sie keine Stöße erzeugen, dann werden dieselben für unsere Wahrnehmung in ein Ganzes verschmolzen; besonders ist dies der Fall, wenn die Tonmischung von einem einzigen Tonerreger ausgeht, weil wir uns für diesen Fall gewöhnt haben, sie als einen einzigen Ton anzusehen; doch kann man bei gespannter Aufmerksamkeit und nach richtiger Anleitung die einzelnen Partialtöne in der Tonmischung unterscheiden, weil eben die Tonempfindung diese Zerlegung selbst vornimmt.

Ueber die Bedeutung der 3 Bogengänge für das Hören war bisher Sicheres nicht bekannt; nach neueren physiologischen Forschungen scheinen dieselben ein Organ für Gleichgewicht, Bewegung und Raum zu sein. Flourens beobachtete zuerst, daß die Durchschneidung eines Bogenganges einer Taube oscillatorische Bewegungen des Kopfes in der Ebene des Ganges bewirkte, daß also das Thier die Fähigkeit verloren hatte, in jener Ebene das Gleichgewicht zu erhalten. Cyon (1878) zeigte, daß bei Fröschen die Störungen sich auf den ganzen Körper, bei Kaninchen nur auf die Augenmuskeln erstrecken, also auf die Körpertheile, die zur Orientirung im Raume dienen, und schließt hieraus, daß die Reizung der Nervencentra der Bogengänge einen bestimmenden Einfluß übe auf die Bildung der Begriffe über den Raum. Hiernach könnten die Bogengänge wohl auch unsere Fähigkeit veranlassen, mit einem Oh-

die Richtung des Schalles wahrzunehmen, wofür man in letzter Zeit besonders „das Hören mit zwei Ohren", das binaurale Hören untersuchte. Rayleigh (1877) fand, daß ein Mensch, dessen eines Ohr verstopft war, über die Stellung einer tönenden Stimmgabel falsche Angaben machte, viel weniger aber über andere Schallarten wie z. B. die menschliche Stimme und Händeklappen; ebenso kann ein Beobachter mit beiden Ohren offen nicht unterscheiden, woher der Schall kommt, wenn vor und hinter ihm gleichgestimmte Gabeln angeschlagen werden, während bei andern Schallquellen die Unterscheidung richtig ist. R. erklärt jenen Mangel durch das gleich starke Hören mit beiden Ohren, wenn die Schallquelle in der Medianebene liegt, während das Hören verschieden stark ist für jede andere Stelle und die Verschiedenheit ein Maximum zeigt in der Verbindungslinie beider Ohren. Thompson (1877) hörte die Stöße zweier Stimmgabeln selbst dann ganz deutlich, wenn der eine Ton durch einen Kautschukschlauch in das eine, der andere in das andere Ohr geleitet wurde, und schließt daraus, daß die Interferenzen selbst durch den Schädelknochen und die Eustachischen Röhren geschehen können. Hierbei bemerkte Th., daß wir den Ton an den Hinterkopf localisiren, wenn wir ihn mit beiden Ohren in entgegengesetzten Phasen empfangen, was besonders deutlich durch Hören mit 2 Telephonen (1878) beobachtet wurde; wenn auf ein mit den Telephonen verbundenes Mikrophon leise mit dem Finger geklopft wurde, so spürte er die Schläge im Hinterkopfe von innen nach außen. Bei verschieden starken Tönen hört das eine Ohr den Ton lauter und die Localisation liegt zwischen diesem Ohr und dem Hinterkopfe. Diese Perception der Phasendifferenz soll von Wichtigkeit sein für das Hören der Qualität zusammengesetzter Töne. Steinhauser stellte (1879) eine mathematische Theorie des binauralen Hörens auf und schloß aus der Formel, daß aus der Verschiedenheit der Schallstärke in beiden Ohren die Richtung der Schallquelle geschätzt werden kann.

Die Obertöne und Nebentöne (Helmholtz 1863). Unter Nebentönen versteht 258 man diejenigen Töne, die ein Tonerreger noch außer seinem Grundtone entwickeln kann; sind dieselben höher als der Grundton, wie es gewöhnlich der Fall ist, so nennt man sie Obertöne. Vollbringen die Obertöne 2, 3, 4 .... mal so viel Schwingungen als der Grundton, so werden sie harmonische Obertöne genannt. Bei der Betrachtung der Tonerreger wurde gezeigt, daß dieselben außer ihrer einfachsten Schwingungsart, bei welcher sie meist als Ganzes schwingen und ihren Grundton erzeugen, auch noch in einzelnen Theilen schwingen können; durch diese Schwingungsarten nun werden die Nebentöne hervorgerufen. Es ist nun hier hinzuzufügen, daß nur höchst selten die einfachste Schwingungsart für sich allein hervorgerufen werden kann, sondern daß die anderen Schwingungsarten meist gleichzeitig mit entstehen; die Grundtöne treten in Verbindung mit ihren Nebentönen auf.

Die Ursache dieser wichtigen Erscheinung liegt in der Art unserer Tonerregung, die in den meisten Fällen eine gewaltsame ist. Wir zupfen, schlagen, reißen reibend die Saiten, wir blasen die heftigsten Luftströme gegen ruhende Luftsäulen, wir stoßen Stimmgabeln auf, wir schlagen auf Platten, Glocken und Membrane oder reiben sie heftig. Da nun die verschiedenen Theilchen durch diese Einwirkungen in der verschiedensten Weise getroffen werden und außerdem einer äußeren Einwirkung in verschiedener Weise widerstehen, so müssen sie auch verschiedene Bewegungen erhalten, es müssen Schw. von den verschiedensten Perioden entstehen. Jede Schw. erzeugt aber in einer Schwingungszeit eine ganze fortschreitende Welle, die Schw. von großer Dauer lange Wellen, die von kurzer Dauer kleine Wellen. Diejenigen Wellen, die zu den Dimensionen des Körpers in verwickelten oder incommensurabeln Verhältnissen stehen, werden durch ihre eigenen reflectirten Wellen aufgehoben; diejenigen Wellen aber, welche in einfachem Verhältnisse zu den Dimensionen des Körpers stehen, die z. B. die 2, 1, 1/2, 1/3, 1/4 .... fache Länge von einer Saitenlänge haben, bilden durch Interferenz mit den reflectirten Wellen stehende, d. i. tönende Schw. Hieraus ist ersichtlich, daß für die Entstehung kleinerer stehenden Wellen die Wahrscheinlichkeit nicht geringer ist als für die größere des Grundtones, daß also die Obertöne meist gleichzeitig mit den Grundtönen auftreten. Die Beschaffenheit der Körper und die Art der Tonerregung entscheidet, ob viele oder wenige Nebentöne entstehen, ob die höheren oder tieferen an Zahl oder Stärke vorherrschen, ob auch Longitudinaltöne bei der transversalen Erregung oder umgekehrt mitklingen u. s. w. — Die musikalischen Töne sind hiernach nicht einfache Töne, sie bestehen nicht aus einfachen, pendelartigen Hin- und Hergängen eines Körpers, nicht aus einer einzigen Schwz., sondern ihre Schwingungsart ist mannichfach zusammengesetzt, sie enthalten viele Schwzn., sie bestehen eigentlich aus mehreren innig mit einander verschmolzenen einfachen Tönen; Helmholtz schlägt deßhalb vor, für dieselben den Namen „Klänge" einzuführen, und unter Ton die eigentlich nie wahrnehmbare, sondern nur theoretisch denkbare Wirkung der einfachen pendelartigen Schw. zu begreifen.

Nachweis. Ist eine Flasche mit einem Membranboden z. B. auf fis_1 abgestimmt, so fliegt ein an derselben hängendes Kügelchen ab, oder auf derselben liegender Sand ordnet sich zu einer und derselben Resonanz-Figur, wenn die Töne fis_1, fis, h_{-1}, fis_{-1}, d_{-1} in der Nähe erklingen, woraus folgt, daß der Ton fis_1 der Flasche enthalten ist in dem Klange fis, h_{-1}, fis_{-1}, d_{-1}, von denen er bezüglich der 1te, 2te, 3te, 4te Oberton ist. — Setzt man auf eine Klaviersaite ein Reiterchen, so wird dasselbe abgeworfen, wenn irgend eine Saite angeschlagen wird, zu deren Obertönen der Ton der ersten Saite gehört; z. B. c_1 wird erregt von c, f_{-1}, c_{-1}, as_{-2}, f_{-2}, d_{-2}, c_{-2}; dies beweist, daß c_1 in all diesen Tönen enthalten ist; das Anschlagen anderer Saiten läßt das Reiterchen in Ruhe. Nur wenn die Obertöne von c_1 selbst erklingen, also c_2, g_2, c_3 . . . oder ein Ton, der diese Obertöne enthält, so werden die Theile der c_1-Saite zum Mitschwingen gebracht; das Reiterchen regt sich in diesem Falle ebenfalls, nur dann nicht, wenn es auf einem Knoten sitzt. — Der beste Nachweis ist mit den Resonatoren zu führen, von denen man gewöhnlich Reihen hat, die auf die 19 ersten Obertöne eines Grundtones abgestimmt sind; schlägt man irgend einen Klang an, während man einen Resonator ins Ohr gesetzt hat, so schmettert ein Ton heftig ins Ohr, wenn der Resonatorton zu den Obertönen jenes Klanges gehört, während im gegentheiligen Falle das vom Tagesgeräusche herrührende Brummen des Resonators unverändert bleibt; so schmettert der Resonator c_2, wenn man die Töne c_1, f, c, as_{-1}, f_{-1}, d_{-1}, c_{-2} angibt. — Auch mit blosem Ohre kann man die Obertöne nach einiger Uebung hören: Man schlage auf dem Klavier z. B. g_1 an und lasse es verklingen; im Momente des Verklingens gebe man c kräftig an und richte die Aufmerksamkeit auf g_1, so wird man dasselbe in dem c hören. An einem anderen Saiteninstrument bringe man einen Flageoletton hervor, und schlage während des Verklingens die Saite selbst an, so wird man in dem Saitentone den Flageoletton hören. Man könnte vielleicht den Einwand erheben, daß das Hören dieser Töne auf Einbildung beruhe, oder daß dieselben durch die Einwirkung des Grundtones auf das Ohr erzeugt würden. Dies wird am besten durch die Thatsache widerlegt, daß man einen bestimmten Oberton durch kein Mittel hört oder sieht, wenn man denselben in dem Klange vernichtet hat. Man kann dies leicht dadurch erzielen, daß man einen Tonerreger in einem Knotenpunkte jenes Obertones erregt; denn nach Young (1800) werden alle Töne nicht erzeugt, die in dem angegriffenen Punkte einen Knoten haben. Zupfen wir z. B. eine Saite in ihrer Mitte, so fehlen dadurch alle geradzahligen Obertöne; man wird dieselben dann auch weder mit blosem, noch mit bewaffnetem Ohre hören, noch sie durch Reiter oder Flaschen nachweisen können. — Schlägt man eine Saite an und berührt sie dann in $\frac{1}{2}$, oder $\frac{1}{3}$, oder $\frac{1}{4}$, so schweigt der Ton als Ganzes, die betreffenden Obertöne klingen aber als Flageolettöne nach, weil man sie durch das Berühren ihres Knotens nicht dämpfen kann; wären sie nicht vorhanden gewesen, so hätte durch die Berührung völliges Verstummen eintreten müssen. — Man kann auch umgekehrte Nachweise führen, indem man einem Grundtone seine Obertöne zumischt; sie vermischen sich dann zu einem für das gewöhnliche Ohr ein Ganzes bildenden Klange. Hat man zwei auf b und b_1 abgestimmte Flaschen (Flaschentöne enthalten fast keine Obertöne) und bläst sie gleichzeitig an, so kann man die beiden Töne nicht mehr unterscheiden. — Appunn in Hanau hat Obertöne-Apparate construirt, in denen durch Zungen die 32, 64 oder 128 ersten Obertöne der Grundtöne $c_{-1} = 64$, $c_{-2} = 32$ und $c_{-3} = 16$ angegeben werden können; läßt man alle oder eine größere Anzahl von Obertönen mit dem Grundtone erklingen, so macht das Tongemisch immer nur den Eindruck des Grundtones. Mittels der Resonatoren hört man alsdann die Theiltöne sehr stark, wodurch dieser Apparat sehr geeignet wird zum Einüben des Hörens mit den Resonatoren.

259 **Die Combinationstöne** (Sorge 1740; Helmholtz 1856). Man versteht unter Combinationstönen diejenigen Töne, welche durch das Zusammenklingen zweier Töne neu gebildet werden. Sie sind nicht etwa in den zwei Tönen schon vorhandene Ober- und Nebentöne, die sich beim Zusammenklingen gegenseitig verstärken; denn sie können meistens durch kein Mittel in den beiden einzelnen Tönen hörbar oder sichtbar gemacht werden, wenn dieselben auch noch so stark sind; dagegen treten sie beim Zusammentönen derselben sofort deutlich hervor, besonders wenn die zwei Töne recht intensiv gleichmäßig anhalten, wie bei der Physharmonica oder bei einer mehrstimmigen Sirene. Die Combinationstöne können objectiv oder auch nur subjectiv sein, d. h. sie können eine selbständige Existenz außerhalb des Ohres haben oder erst im Ohre entstehen; das erste ist der Fall, wenn die beiden Töne durch und in demselben Luftraume sich bilden, z. B. in einer mehrstimmigen Sirene, weil sie dann auch auf dieselbe äußere Luftmenge verän-

dernd einwirken; das letzte findet statt, wenn die Erregungsstellen der beiden Töne ganz von einander getrennt sind und keinen mechanischen Zusammenhang haben. Die objectiven Combinationstöne kann man mit Resonatoren leicht hören oder durch Membrane sichtbar machen; für die subjectiven muß man das Ohr einüben. Die Combinationstöne sind entweder Differenztöne (Tartini'sche Töne) oder Summationstöne: **Die Schwingungszahl der Differenztöne ist gleich der Differenz, die der Summationstöne gleich der Summe der Schwingungszahlen der beiden primären Töne.**

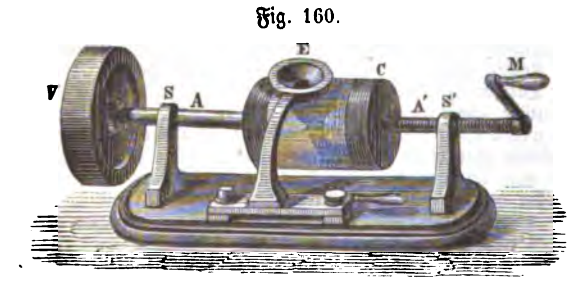
Nachweis. Appunns Tonmesser enthält 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schw. der Sec. mehr gibt als die vorangehende; man kann dies schon daran erkennen, daß beim Anblasen von je zwei nebeneinander liegenden Zungen 4 Stöße entstehen (266.). Bläst man 2 um 8 Zungen von einander entfernte Töne an, so hört man mit einem Resonator immer den Differenzton $c_{-2} = 32$; bläst man den tiefsten Ton $c = 128$ und die um 16 Zungen höher liegende Quinte $g = 192$ an, so hört man als Differenzton die tiefere Octave $c_{-1} = 64$ und den Summationston $e_1 = 320$. Läßt man auf Appunns Obertöneapparat die 2 Töne $c = 128$ und $g = 192$ erklingen, so hört man mit wenig geringerer Intensität den Summationston $e_1 = 320$ mitklingen; man hört den Accord $c:g:e_1$. Den Differenzton $c_{-1} = 64$ kann man nur dann beobachten, wenn man das Ohr leicht auf die Oberplatte des Apparates auflegt. Dieses früher nicht bekannte Vorwalten des Summationstones über den Differenzton tritt nach Appunns Beobachtungen besonders bei den Combinationstönen hervor, die aus Tönen der kleinen und der ersten Hälfte der eingestrichenen Octave resultiren, während sonst mehr der Tartinische Ton vorwaltet.

Weil die Schwz. der Differenztöne gleich der Zahl der Stöße ist, so glaubte man früher in ihnen die Wirkung dieser wegen ihrer großen Zahl einzeln nicht mehr wahrnehmbaren Stöße zu erkennen; da die Stöße aber durch Summirung zweier Töne entstehen, so müßten die Combinationstöne auch noch bei schwachen primären Tönen hörbar sein, was durchaus nicht der Fall ist; auch wäre hiermit der Summationston unerklärt. Aus diesen und anderen Gründen hat Helmholtz die frühere Erklärungsweise verlassen und gibt als Ursache der Combinationstöne eine Abweichung von Fouriers Gesetz an, welche dann eintritt, wenn die Schwingungsbewegungen große Amplituden haben. Sowie das Gesetz über die gleiche Dauer der Pendelschw. nur für sehr kleine Bogen gilt, so gilt auch das Gesetz von der Zerlegung zusammengesetzter Schw., daß nämlich eine zusammengesetzte Bewegung sich nur in die elementaren pendelartigen Bewegungen zerlege, aus denen dieselbe sich gebildet habe, nur für unendlich kleine Schw.; haben die Schw. aber größere Amplituden, so entstehen durch Aufeinanderstoßen der schwingenden Theilchen secundäre Schwingungsbewegungen; die Zahl der Schw. derselben ist entweder gleich der Differenz oder gleich der Summe der Schwz. der primären Töne. — Es gibt auch Combinationstöne der Obertöne, sowie solche der Combinationstöne mit den primären Tönen; doch sind dieselben sehr schwach; nach einiger Uebung sind sie auf dem Obertöne-Apparat zu erkennen.

Nicht alle Physiker haben die Helmholtz'sche Theorie der Combinationstöne uneingeschränkt adoptirt, sondern blieben theilweise bei der zuerst von Young (1793) gegebenen Erklärung der Differenztöne durch die Stöße. So construirte Appunn eine große Doppelpfeife mit verschiebbaren Kolben, in welcher beim Verändern der Kolbenstellung die Zahl der Stöße wächst und schließlich ein dritter Ton gleich der Differenz der Schwzn. der beiden Pfeifentöne auftritt; die Summationstöne erklärte A. als Differenztöne aus den Obertönen der Primärtöne oder als Differenztöne höherer Ordnung. Eine sehr eingehende Untersuchung mit großen Stimmgabeln, deren Töne durch Resonanzröhren verstärkt, andauernd und rein hergestellt wurden, liegt von dem berühmten Akustiker R. König in Paris (1875) vor; derselbe erklärt, daß die Helmholtz'schen Differenz- und Summationstöne wirklich existirten, und gibt auch Mittel an, dieselben unbeeinflußt von anderen Combinationstönen zu hören, wobei sich herausstelle, daß dieselben sehr schwach seien. Aber außer diesen Helmholtz'schen gäbe es noch andere Combinationstöne und zwar Stoßtöne, die durch die Stöße entständen; die stärksten Stoßtöne seien diejenigen, deren Schwzn. der Differenz der Schwzn. der primären Töne gleichkomme, die sog. Tartini'schen Töne; es gäbe aber auch Stoßtöne, welche von den Stößen herrühren, die beim Zusammenklang eines Grundtones mit einem zweiten Tone entstehen, der einem der harmonischen Obertöne des Grundtones nahe liege (Ueber die von König neu entdeckten Stöße s. 266): Und diese Stoßtöne der Obertöne hätten häufig eine Schwz. gleich der Snmme der Schwzn. der Primärtöne, würden also mit den Helmholtz'schen Summationstönen verwechselt. K. L. Bauer zeigte (1878) mathematisch, daß in zahlreichen Fällen die Schwz. der Stoßtöne der Obertöne gleich der Summe der Schwzn. der Primärtöne sein kann. Bosanquet sprach sich (1881) entschieden gegen die Theorie von König aus.

260 **Die Reproduction der Töne, der Phonograph** (Edison 1877). Zu den Tonerregern kann auch der Phonograph gezählt werden, wenngleich er nicht Eigentöne zu produciren, sondern nur hineingeleitete Töne zu reproduciren vermag. Die Schwingungen eines eingeleiteten Tones werden von einer Membran aufgenommen und durch einen Stift in schraubenlinienförmiger Aufeinanderfolge als Eindrücke auf eine Stannioltafel aufgezeichnet, die eine um- und fortgedrehte cylindrische Trommel bedeckt. Wird das so erhaltene Phonogramm abermals unter dem Stifte fortgedreht, so versetzt es diesen und die Membran wieder in die Schwingungen des Tones, wodurch dieser hörbar reproducirt wird. Der Phonograph reproducirt jedoch nicht nur einen Ton, sondern jede beliebige Reihe und ein Gemisch von Tönen, ja sogar die menschliche Sprache, also auch das Geräusch der Consonanten und andere Geräusche, jedoch nicht alle gleich gut und keinen Schall in reiner Gleichheit und Deutlichkeit; auch wird jedes Phonogramm bald unbrauchbar, erzeugt nur noch unverständliche Geräusche. Indessen ist es wohl möglich, daß diese Mängel noch verbessert oder ganz beseitigt werden.

Fig. 160.



Die Einrichtung des Phonographen kann etwas näher an Fig. 160 erkannt werden. AA' ist die durch die Kurbel drehbare Achse, deren Drehung durch das Schwungrad V gleichmäßiger wird. Der Theil A der Achse ist glatt und kann in dem Lager S sich lose drehen und fortbewegen; der Theil A' aber ist eine Schraube, die im Lager S' sich in einer Mutter dreht und daher bei der Drehung sich auch in der Achsenrichtung verschiebt. Mit der Achse dreht und verschiebt sich die Trommel C, auf deren Mantel die Schraubentheilung, das aufgebreitete Stanniolblatt und die phonographischen Eindrücke sichtbar sind. E ist der Schalltrichter, der den Schall aufnimmt und auf seinen Membranboden leitet; bei den besseren Apparaten ist der Schreibstift nicht direct an der Membran, sondern an einer eigenen Feder befestigt, welche von einem kleinen Holzkegel berührt wird, der an der Membran fest sitzt. Wird nun in den Schalltrichter gesungen und die Kurbel gedreht, so gerathen die Membran und der Stift in Schw.; jeden Augenblick schiebt sich aber eine folgende Stelle der Schraubenwindungen der Trommel unter den Stift, so daß derselbe seine Schw. in der Folge dieser Windungen auf den Stanniol zeichnet. Nach der Aufzeichnung wird der Schalltrichter zurückgeschlagen und die Trommel in die Anfangslage gebracht durch entgegengesetzte Drehung der Kurbel; dann wird der Schalltrichter an die Trommel herbeigelenkt und besonders dafür gesorgt, daß sich der Stift wieder in der von ihm vorher beschriebenen Schraubenfurche befindet; wird nun die Kurbel in der alten Richtung gedreht, so wird der Stift, da er über die Eindrücke und Hervorragungen der Furche hingleitet, in dieselben Schw. versetzt, die er beim Hineinleiten des Schalles ausgeführt hat; er versetzt demnach auch die Membran und die Luft in dieselben Schw. und reproducirt so den Schall. Zur Verstärkung desselben wird noch ein konischer Schallbecher dicht schließend in die Mündung des Trichters gesetzt, und zwar mit einem leichten Druck, der die Berührung des Stiftes mit der Furche inniger macht. Besonders deutlich gibt der Phonograph Gelächter und nachgemachtes Hundegebell wieder, sowie Pfeifen- und andere hohe Töne; auch das Singen und Sprechen hoher Stimmen ist noch deutlich, besonders wenn die Wörter aus den Vocalen A, O, U und den Consonanten t, k, h, r bestehen, weniger gut tiefe Stimmen und die Vocale E und J und s-ähnliche Consonanten.

Nach der Erfindung des Phonographen gaben sich manche Zeitungen phantastischen Träumen über seine Wirkungsfähigkeit hin; sie meinten, selbst in fernen Jahrhunderten werde ein Phonogramm noch die Stimme einer berühmten Sängerin, die Rede eines großen Staatsmannes hörbar machen; als man nun die meckernde Stimme des Phonographen vernahm und die leicht vergänglichen Phonogramme erblickte, verlor der Phonograph allen Credit; die Wissenschaft hat ihn zu erneutem Ansehen gebracht, da sie ihn zu Forschungen über das Wesen des Schalles in manchen Fällen als sehr geeignet erkannte; wir werden bald hören, daß der Phonograph in einer lange geführten Streitfrage das entscheidende Wort gesprochen hat.

260a **Aufg.** 406. Welchen Ton gibt eine 1m lange, 1mm dicke Saite, deren spec. G. = 1 ist, und welche durch 1kg gespannt wird? Aufl.: Nach Fl. (32) ist $n = 56 = a_{-2}$. — A. 407. Wie muß die Saite gespannt werden, damit sie e gebe? Aufl.: 8,347kg. — A. 408. Welchen Ton gibt sie bei 25kg? Aufl.: cis_1. — A. 409. Was ist zu thun, damit sie bei dieser Spannung e_1 gebe? Aufl.: Steg in $^5/_6$. — A. 410. Welche Töne erhält man beiderseits, wenn man durch den Steg 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 50cm abschneidet? Aufl.: 2800 und 311, also f_4 und dis_1; ebenso f_3 und f_1, b_2 und g_1, f_2 und b_1, cis_2 und cis_2. — A. 411. Wo muß man den Steg hinschieben, um die Töne der cis-dur-Tonleiter zu erhalten? Aufl.: 889, 800, 750, 667, 600, 533, 500mm. — A. 412. Wenn eine Saite von 60cm Länge und 0,6cm Dicke den Ton c_1 gibt, welchen Ton gibt unter sonst gleichen Umständen eine Saite von 40cm Länge und 0,8mm Dicke? Aufl.: d_1. — A. 413. Eine Saite gibt g_1; welchen Ton gibt unter übrigens gleichen Umständen eine 3 mal weniger dicke Saite bei 4 mal kleinerer Spannung? Aufl.: d_2. — A. 414. Die Längen zweier Saiten sind 90 und 70cm, die Dicken 0,8 und 1,2mm, die Spannungen 16 und 9kg; wie verhalten sich die Schwzn.? Aufl.: 14 : 9. — A. 415. Von 4 gleichen Metallstäben ist der eine 20cm, die anderen 30, 40, 50cm lang; welche Töne geben die letzteren, wenn der erste c_4 erzeugt? Aufl.: b_2, c_2, f_1. — A. 416. Wie viel Schw. ergibt ein cylindrischer, an einem Ende eingeklemmter Eisenstab von 10cm Länge und 1cm Dicke? Aufl.: Nach Fl. (33) ist $n = 1405$. — A. 417. Wie viel Schw. würde derselbe bei 1mm Dicke machen? Aufl.: 140. — A. 418. Welchen Ton gibt der letzte Stab bei 5cm Länge? Aufl.: 560, etwa cis_2 (Versuch mit einer Stricknadel). — A. 419. Wenn der Stab von A. 417 mit 0, 1, 2, 3 Knoten schwingt, welche Töne gibt er dann? Aufl.: 140 = cis, dis_3, a_4, a_5 circa. — A. 420. Welches ist der longitudinale Grundton des Stabes in A. 416? Aufl.: Nach Fl. (34) ist $n = 12545$. — A. 421. Wie groß ist die Geschw. des Schalles in jenem Eisenstabe? Aufl.: Nach Fl. (35) ist $c = 4\,l\,n = 5018$m. — A. 422. Welchen Ton gibt eine gedeckte Lippenpfeife, deren Länge = 2m ist? Aufl.: Nach Fl. (36) ist $n = 42$. — A. 423. Wie groß berechnet sich hieraus die Geschw. des Schalles in der Luft? Aufl.: Nach (36) oder (37) $c = 336$m genauer 333,5m. — A. 424. Welches sind die Obertöne dieser Pfeife? Aufl.: h_{-1}, a, d_1, g_1 ca. . . . — A. 425. Welche Töne erzeugen gedeckte Pfeifen von 5dm, 2dm, 1dm Länge? Aufl.: e—f, gis_1, gis_2. — A. 426. Wie lang darf eine gedeckte Pfeife nur sein, um c_4 zu geben? Aufl.: 4cm. — A. 427. Wie lang für denselben Zweck eine offene Pfeife? Aufl.: 8cm. — A. 428. Welchen Ton gibt eine offene Pfeife von 1m Länge? Aufl.: Nach (38) ist $n = 166$, also etwa e. — A. 429. Welche Länge ist nöthig für den Ton c_2: Aufl.: 32cm. — A. 430. Welches sind der erste, zweite und dritte Differenzton, sowie der Summationston von c_1 und a_1? Aufl.: f, f_{-1}, f_1, f_2. — A. 431. Die 3 ersten Differenztöne von h_2 und b_2, sowie den Summationston zu finden? Aufl.: b_1, c_{-1}, b_2, fis_3.

4. **Der Klang** (Helmholtz 1863).

a. Die Klangfarbe.

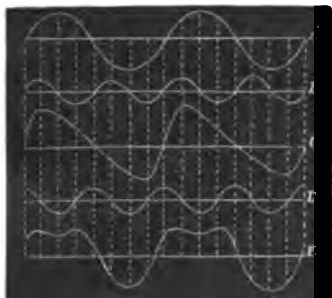
261 **Begriff der Klangfarbe.** Unter Klangfarbe versteht man die Eigenthümlichkeit, durch welche die Klänge verschiedener Instrumente und verschiedener Stimmen, wenn sie auch gleiche Höhe und gleiche Stärke besitzen, sich von einander unterscheiden. Da die Tonhöhe durch die Schwingungszahl und die Stärke durch die Schwingungsweite bedingt ist, so war man schon seit langer Zeit der Meinung, daß die Klangfarbe von der Schwingungsform oder Wellenform abhänge, welche Form man entweder durch Auftragen der Elongationen zu beiden Seiten einer die Schwingungszeit darstellenden Achse (nach 224.) oder nach Lissajous' Methode (235.) erkennen kann. Einfache pendelartige Schwingungen geben immer dieselbe einfache, regelmäßige Wellenform (Fig. 138, S. 232); diese Form wird nur verändert, wenn die Schwingungsbewegung eine zusammengesetzte ist. Wenn also die Klangfarbe von der Verschiedenheit der Schwingungsform herrührt, so muß sie ihren tieferen Grund in der verschiedenartigen Zusammensetzung der Wellen des Klanges haben. Zusammengesetzte Wellen werden aber nach Ohms Klanggesetz durch das Ohr in eine Anzahl pendelartiger Schwingungen zerlegt, denen eben so viele einfache Töne entsprechen, der Grundton mit seinen Nebentönen, meistens der Grundton mit seinen harmonischen Obertönen. Hieraus würde sich ergeben, daß die Klangfarbe von der Art der Mischung des Grundtones mit den Neben-

oder Obertönen abhänge. Diese hypothetische Folgerung erhält dadurch eine Stütze, daß nach 258. wirklich die meisten Klänge nicht einfache Töne, sondern aus dem Grundtone und den Nebentönen zusammgesetzt sind. Die näheren Untersuchungen von Helmholtz (1863) haben es über allen Zweifel erhoben: **Die Klangfarbe hängt nur ab von der Anzahl, Höhe und Stärke der Nebentöne, die einem Grundtone beigemischt sind, und welche bei den musikalischen Klängen harmonische Obertöne sein müssen.**

Hierbei wird indeß abgesehen von den Geräuschen, welche häufig mit der Tonbildung verknüpft sind, von den Zischgeräuschen der Blasinstrumente, den Kratzgeräuschen der Saiteninstrumente, von den Eigenthümlichkeiten des Tonansprechens und des Verklingens, welche ebenfalls bei jedem Klange etwas Charakteristisches haben, das von dem gewöhnlichen Ohr zur Erkennung des Klanges unbewußt benutzt wird; der Satz von Helmholtz bezieht sich nur auf den Klang des reinen fertigen Tones nach Abzug seiner unwesentlichen Nebenelemente. Dieser Satz ist kein Gesetz, sondern eine Begriffsbestimmung; er ist daher nicht mathematisch zu beweisen, sondern durch Versuche nachzuweisen. Mittels der Resonatoren und anderer Klangzerlegungsmethoden ist darzuthun, daß und warum die Klänge der verschiedenen Tonerreger eine verschiedene Zahl verschieden hoher und starker Nebentöne enthalten, und welche Klangfarbe durch die verschiedenen Combinationen der Grundtöne mit den Nebentönen entsteht; eine noch festere Begründung erhält der Satz von Helmholtz, wenn das umgekehrte Verfahren gelingt, wenn man nämlich durch künstliche Erzeugung dieser Mischungen die betreffende Klangfarbe nachahmen kann.

Wie durch Zusammensetzung von Schwingungsbewegungen die Wellenform sich ändert, ist aus Fig. 161 zu ersehen. A und B stellen die Wellen eines einfachen Grundtones und seiner Octave vor. In C sind an gleichen Stellen der gleichen wagrechten Achse die senkrechten Ordinaten dieser Curven, welche die Elongation der schwingenden Theilchen vorstellen, addirt oder subtrahirt aufgetragen, je nachdem sie auf einer Seite oder zu beiden Seiten der wagrechten Achse liegen; hierdurch entsteht denn die ganz neue Wellenform C. Verbindet man in derselben Weise die Welle B in der Lage D, wo die Phasen um $^1/_4$ der Wellenlänge verschoben sind, mit A, so entsteht die von C ganz verschiedene Welle E. Obwohl also die Bestandtheile von C und E dieselben sind, so bilden dieselben doch ganz verschiedene Verbindungen, weil sie in verschiedenen Phasen combinirt sind. Hieraus könnte man schließen, daß der Phasenunterschied zweier Töne einen Einfluß auf den Klang haben könnte; dies ist aber nicht möglich, weil das Ohr die beiden Formen C und E nach den Gesetzen des Mitschwingens in ganz gleicher Weise in die beiden Elemente A und B zerlegt, also in beiden Fällen Grundton und Octave empfindet.

Fig. 161.



Die Klangfarbe der Klänge ist also unabhängig von dem Phasenunterschiede der mit dem Grundtone verbundenen Nebentöne, ein Satz, der ebenfalls von Helmholtz durch Versuche nachgewiesen wurde. Hiermit ergibt sich denn auch, daß die ursprüngliche Meinung, der Klang hänge von der Schwingungsform ab, sich nicht vollkommen bewährt, da verschiedene Wellenformen demselben Klange zugehören können. Die Unabhängigkeit des Klanges von dem Phasenunterschiede der Töne gilt indeß nur für musikalische Klänge, nicht aber für Geräusche; auch ist das binaurale Hören nach Thompson (1879) im Stande, Phasenunterschiede erkennbar zu machen.

262 1. **Klänge ohne Obertöne.** Kein Tonerreger gibt für sich einen einfachen Ton; Klänge ohne Obertöne müssen also künstlich erzeugt werden. Dies kann z. B. geschehen, indem man eine angeschlagene Stimmgabel über eine auf denselben Ton abgestimmte Resonanzflasche hält; die Obertöne einer Stimmgabel sind unharmonisch zu dem Grundtone, stimmen daher nicht mit den Obertönen der Flasche (die ohnedies schwer ansprechen) und können dieselben also auch nicht zum Mittönen bringen; nur der Grundton der Flasche wird demnach durch die Gabel angeregt; Helmholtz hat durch Anwendung des Elektromagnetismus und einer abgestimmten Resonanzröhre dem reinen Stimmgabelton gleichmäßige Stärke und lange Dauer verliehen; Lord Rayleigh hat (1879) gefunden, daß die Töne singender Wasserstoffflammen ganz rein von Ober- und Nebentönen werden, wenn man sie in einem weitbauchigen Lampencylinder erzeugt. Diese reinen Grundtöne klingen sehr weich und in der Tiefe dumpf und leer. Man benutzt sie zur **Synthese der Klangfarben.** Mischt man zu einem reinen Grundtone seine fünf ersten harmonischen Obertöne,

die Octave, die Quinte der Octave, die Doppeloctave, die Terz und Quint derselben, jedoch in viel geringerer Stärke als der Grundton, so enthält das Tongemisch, unmerklich für das gewöhnliche Ohr, aber von ihm empfunden, einen Duraccord, der Ton wird reich, voll, wohllautend, harmonisch, wie es die Töne der offenen Orgelpfeifen, der Flöte, des Horns, des Klaviers, der mittelstarken menschlichen Stimme sind. Werden aber die höheren Obertöne noch zugemischt, besonders diejenigen, welche 7, 11, 13 . . . mal soviel Schw. als der Grundton vollziehen, welche also gegen einander unharmonisch sind, mit einander dissoniren, so wird das Ohr von den verschiedensten, theilweise gegen einander unharmonischen Empfindungen erregt, der Ton wird scharf und rauh. Man kann dies besonders gut mit Appunns Obertöne-Apparat zeigen, wenn man sämmtliche 64 Partialtöne auf einmal anbläst; bei den Mixturregistern der Orgel öffnet jede Taste nicht eine einzige Pfeife, sondern eine ganze Reihe, welche die harmonischen Obertöne des betreffenden Tastentones geben, dadurch wird der Klang durchdringend, mächtig, aber scharf und rauh. *Klänge ohne Obertöne sind weich und dumpf, Klänge mit den 5 ersten Obertönen sind reich und harmonisch, Klänge mit vielen, besonders mit hohen Obertönen sind rauh und scharf.*

2. *Klänge mit unharmonischen Obertönen.* Die Transversalklänge der *Stimmgabeln und anderer Stäbe* sind (nach 247.) mit sehr hohen und unharmonischen Nebentönen, oft auch mit gleichzeitig erregten Longitudinaltönen verbunden. Bei der Stimmgabel hört man wegen des starken Klanges dieser Obertöne beim Anschlagen den Grundton kaum; da dieselben aber rasch verklingen, so wird der Grundton sehr bald fast allein hörbar. Auch in Stäben von Glas und Holz verklingen die Obertöne sehr rasch, aber mit ihnen der Grundton, weil die Elasticität und Masse solcher Stäbe geringer ist; daher haben solche Stäbe einen kurzen Ton im Vergleiche mit Metallstäben, deren größere Masse auch wegen größerer Elasticität länger in ihrer Bewegung verharrt; *der metallische Klang beruht in dem ausdauernden Vorwalten hoher Obertöne.* Weil dieselben bei Stäben sehr hoch sind, so fällt das Unharmonische derselben bei karger Verwendung weniger ins Ohr und gibt in manchen Fällen den Musikstücken etwas Helles und Heiteres, worauf die Anwendung der Triangel und des Schellenbaumes beruht; aber eine ausschließliche, länger dauernde Stabmusik wird doch bald unerträglich. Noch mehr gilt dies für Scheiben, Glocken und Membrane, weil deren unharmonische Nebentöne dem Grundtone sehr nahe liegen. Nur bei Glocken kann man die Töne harmonisch zu einander machen, wenn dieselben nach dem Rande zu dünner werden; das Glockengeläute, das Glockenspiel und die Glasharmonica sind daher eher erträglich, obwohl längere Stücke derselben die Nerven angreifen.

263

3. *Die Klänge der Saiten.* a. Gezupfte oder geschlagene Saiten. Da hier die Obertöne durch Mitschwingen aliquoter Saitentheile entstehen, so sind dieselben harmonisch zu dem Grundtone; die Zahl und Stärke der Obertöne ist verschieden nach der Art des Anschlages, nach der Stelle des Anschlages und nach der materiellen Beschaffenheit der Saiten. Je schärfer das Eck ist, welches die Saite durch den Anschlag oder das Zupfen bildet, desto kürzer und breiter sind die hierdurch erzeugten Wellen, desto höher und stärker sind demnach die entstehenden Obertöne, desto klimpernder wird der Klang; die Obertöne überwiegen sogar den Grundton an Stärke, wenn man die Saiten mit einem metallenen Stifte reißt oder schlägt; man hört in diesem Falle den Grundton kaum, es entsteht ein leerer klimpernder Klang. *Leer ist also ein Klang, wenn die Obertöne zu stark gegen den Grundton sind.* Am vollsten wird der Ton, wenn man mit dem weichen Finger zupft, etwas weniger voll beim Anschlagen mit einem weichen Hammer, wie es im Klavier geschieht; hier sind besonders die tiefen Obertöne sehr stark, oft stärker als der Grundton, wodurch der Ton zwar an Macht einbüßt, aber an harmonischer Fülle gewinnt. — Die Anschlagstelle hat den Einfluß, daß (nach Young) sämmtliche Töne fehlen, deren Knoten in die Anschlagstelle fallen. Schlägt man in der Mitte an, so fehlen alle geradzahligen Obertöne, also auch sämmtliche Octaven des Grundtones; der Ton wird näselnd und hohl. *Hohl ist ein Klang, dem die näheren und dem Grundtone nächstverwandten Obertöne fehlen.* Liegt die Anschlagstelle einem Saitenende nahe, so entstehen kleine Wellen, hohe Obertöne, der Klang wird klimpernd. In den Klavieren legt man die Anschlagstelle etwa in 1/7 der Saitenlänge; hierdurch werden der siebente und neunte Oberton, welche gegen einander unharmonisch sind, und welche deßwegen den meisten Saitenklängen einen unharmonischen, scharfen Charakter geben, gedämpft, dagegen überwiegen die tieferen Obertöne, Octaven, Quinte, Terz, wodurch der Ton voll und harmonisch wird. Nur bei den höheren Klaviersaiten, bei welchen wegen der Steifigkeit kurzer Saiten die Obertöne schwer ansprechen, legt man die Anschlagstelle näher an das Saitenende; auch in dicken Saiten sprechen die Obertöne schwerer, um so leichter aber in sehr dünnen Metallsaiten an; auf einer solchen erhielt Helmholtz noch den 18. Oberton. Auf Darmsaiten verklingen

die hohen Obertöne rascher; die Guitarre und die Harfe sind daher weniger klimpernd als die Zither. b. Gestrichene Saiten geben einen stärkeren Grundton, weil die Erregung nicht so beschränkt ist; die ersten Obertöne sind schwach, 4, 9, 16 mal schwächer als der Grundton; die höheren Obertöne vom sechsten bis zum zehnten sind viel deutlicher und verursachen die Schärfe des Klanges gestrichener Saiten. (Untersuchungen von Helmholtz mit dem Vibrations-Mikroskop.)

Klänge der Pfeifen. a. Offene Lippenpfeifen. Sind die Pfeifen sehr weit, wie es bei den Principalstimmen der Orgel der Fall ist, so sprechen die Obertöne schwer an; daher ist nur der erste Oberton stark, der zweite schon sehr schwach; der Klang ist stark, weich und voll. Aus demselben Grunde ergeben bei schwachem Anblasen die höheren Flötenregister der Orgel und die gewöhnlichen Flöten weiche, schwache Töne. Die engen, cylindrischen Geigenregister der Orgel lassen dagegen die höheren Obertöne, bis zum sechsten einschließlich, laut erklingen; außerdem entsteht hier bei stärkerem Anblasen das Blasegeräusch, dessen Theilchen häufig zur Verstärkung der höheren Obertöne beitragen; hierdurch erhalten die Klänge dieser Register etwas geigenartig Scharfes. Die spitzen Orgelpfeifen, wie Gemshorn und Spitzflöte, haben einen hellen leeren Klang, weil der vierte bis sechste Oberton die tieferen an Stärke übertreffen und einem schwachen Grundtone beigemischt sind. — b. Gedeckte Lippenpfeifen. Nach 250. sind bei den gedeckten Pfeifen nur die ungeradzahligen Obertöne möglich, die Octaven fehlen; weite gedeckte Pfeifen geben daher wie Flaschen fast einfache Töne; bei engeren klingt namentlich der zweite Oberton, die Quinte der Octave am stärksten mit, weßhalb solche Orgelpfeifen Quintaten heißen. Gedeckte Pfeifen klingen im Allgemeinen wegen geringer Obertönezahl weicher und in der Tiefe dumpfer als die offenen. Ebenso klingen Holzpfeifen weicher und weniger hell als Metallpfeifen, weil die höheren Obertöne durch stärkere Reibung aufgehoben werden. — c. Zungenpfeifen. Bei freien Zungen ohne Schallbecher wird der Ton ausschließlich durch die Zunge vermittelt, deren Oeffnen und Schließen des Windspaltes Luftstöße verursacht. In diesen Stößen haben die Lufttheilchen die verschiedensten Bewegungen; deßhalb entstehen sehr viele Obertöne, bis zum zwanzigsten und darüber; die Zungenklänge sind scharf und schnarrend, am meisten bei aufschlagenden Zungen, am wenigsten bei den freien, weichen Stimmbändern des Menschen. Ein Schallbecher übt (nach 252.) in den meisten Fällen einen großen Einfluß schon auf den Grundton aus; noch größer ist derselbe für die Obertöne, welche verstärkt werden, wenn sie den eigenen Obertönen der Zunge entsprechen, im anderen Falle aber gedämpft werden bis zum Verschwinden. Eine weite Resonanzkugel, die mit dem Grundtone einer Zunge stimmt, verlöscht alle Obertöne derselben. Außerdem gibt eine Zungenpfeife, da sie an der Zunge als gedeckt anzusehen ist, nur die ungeradzahligen Obertöne; an Appunns Zungenpfeife treten besonders der 9te, 11te und 13te Oberton stark hervor. Aus diesem Grunde hat die Clarinette einen etwas hohlen, näselnden Klang. Bei den anderen Blasinstrumenten, die sich durch ihre kegelförmige Erweiterung mehr den offenen Pfeifen nähern (252.), treten auch die geradzahligen Obertöne auf, weßhalb ihr Klang voller ist.

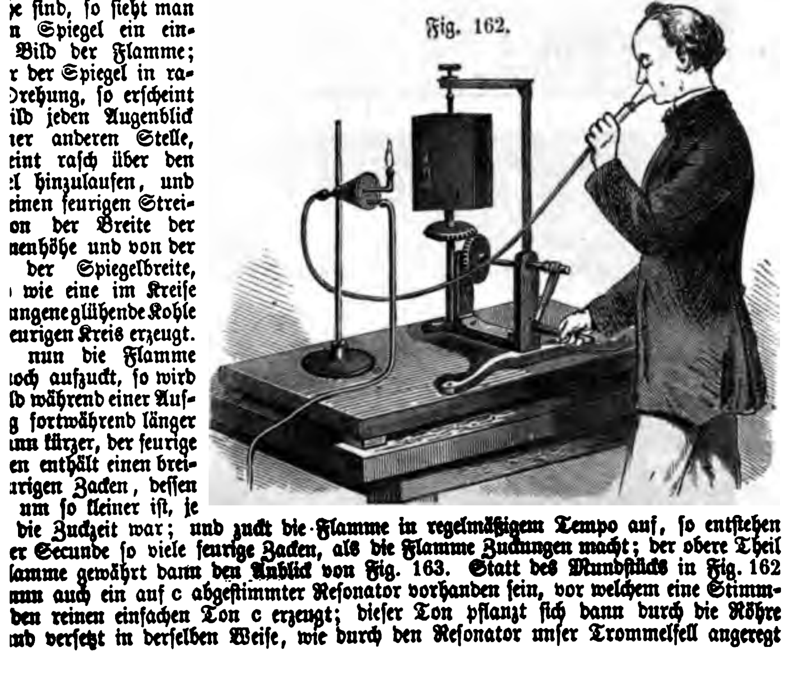
264 **Klänge der Vocale.** Die Zahl der Obertöne ist bei der menschlichen Stimme, da dieselbe eine Zunge ist, groß; in kräftigen Baßstimmen kann man bei hellen Vocalen noch den 16ten Oberton erkennen; die hohen Obertöne sind in hellen, scharfen Stimmen stärker als in weichen und dumpfen. Der Klang beim Sprechen ist heller und schärfer als beim Singen, wahrscheinlich weil (nach Helmholtz) die Stimmbänder beim Sprechen etwas über einander schlagen, also wie aufschlagende Zungen wirken. Bei der Bildung der Vocale wirkt die Mundhöhle als Schallbecher mit, sie dämpft einzelne Obertöne, läßt anderen ihre Stärke, verstärkt andere, und verleiht einem oder zwei Obertönen von ganz bestimmter absoluter Höhe im Notensystem (nicht im Verhältnisse zum Grundtone) dadurch eine ganz besondere Stärke, daß sie durch eigene Stimmung auf jene Töne abgestimmt wird. Die Zumischung dieser Bestimmungstöne von ganz bestimmter Höhe und die Verstärkung einer gewissen Zahl und Ordnung von harmonischen Obertönen gibt dem Grundtone den eigenthümlichen Klang, der auf unser Ohr den Vocaleindruck macht. Jene Bestimmungstöne der Vocale ändern sich nach der Klangfarbe eines und desselben Vocales in verschiedenen Dialecten und Sprachen, nicht aber nach Alter und Geschlecht. Der Vocal U enthält den Bestimmungston f, der Vocal O ist charakterisirt durch den Ton b_1, der Vocal A durch den Ton b_2, der bei dem scharfen A der Engländer und Italiener bis d_3 steigt. Die übrigen Vocale enthalten zwei Bestimmungstöne: im Ae finden sich g_3 und d_2, im E sind b_3 und f_1 enthalten; der hohe Ton d_4 und der tiefe Ton f bilden den Klang des J, während das Ue zwar auch den Ton f, aber das weniger hohe g_3 enthält, und das Oe, ähnlicher dem E, die Töne f_1 und cis_3 in sich trägt. Um diese Töne dem Grundtone zumischen zu können, erhält beim U die Mundhöhle die Gestalt einer Flasche ohne Hals mit einer engen Oeffnung, dem Munde, die sich für das O bei gleichartiger Zusammenziehung der Höhlung selbst etwas erweitert und für das A in vollständige Trichterform übergeht. Für das Ae wird der Höh-

der Flasche im Hintermunde wieder etwas weiter, er liegt ganz im Schlunde, wäh-
n Vordermunde zwischen Zunge und Gaumen diesem Hohlraume ein enger Hals
st wird; dadurch entstehen zwei Töne, der Halston ist der höhere, der Flaschenton der
beim Ae ist der Hals noch weit, der Hohlraum eng, bei E und J wird der Hals
noch etwas enger und der Hohlraum immer weiter. Für das Oe und Ue ver-
sich der Hals bis an die Lippen, der hohe Oberton wird tiefer. Werden mensch-
esonders Baßstimmen zu stark angestrengt, so liegen die Obertöne d_4 bis g_4 in den-
da nun der Gehörgang gerade auf diese Töne abgestimmt ist, so wird das Ohr
iene gegen einander dissonirenden Töne empfindlich erregt, und hört in starken, schreien-
Männerchören ein unangenehmes Gerassel.

Der Vocalapparat von Helmholtz macht experimentelle Nachweise für die vorausge-
en Sätze und Erscheinungen möglich. Derselbe besteht aus vielen Stimmgabeln, die
ien Grundton, dessen Obertöne und die bestimmten Vocalobertöne abgestimmt sind.
timmgabeln werden in andauernde Schwingungen versetzt durch die beiden Pole eines
magnetes, dessen elektrischer Strom durch einen anderen Stimmgabelapparat nach
niß unterbrochen wird, und werden durch eine gegenüberstehende Resonanzröhre ver-
Königs Apparat zu demselben Zwecke besteht aus sehr guten Stimmgabeln, die auf
anzkästen befestigt sind und daher lange tönen. Auch Appunns Obertöneapparat kann
suchen über die Klangfarbe benutzt werden. Um einen bestimmten Klang zu erzeugen
inen der angeführten Sätze nachzuweisen, läßt man den Grundton und die betreffen-
bertöne gleichzeitig erklingen. Appunn hat übrigens auch einen aus Zungen und
zusammengesetzten Vocalapparat construirt.

Diese Vocalapparate setzen die Klänge aus Partialtönen zusammen, dienen also zur
hese der Klänge. Die Analyse der Klänge hat dagegen zum Ziel, die Klänge in
artialtöne zu zerlegen. Die akustische Analyse kann nicht so weit gehen wollen,
rtialtöne eines Klanges gleichzeitig isolirt hörbar zu machen; sie hebt vielmehr einen
em anderen aus dem Tongemisch stark hervor und weist so seine Existenz nach; es
t dies mittels der Resonatoren. Sichtbar gemacht werden die Partialtöne durch die
i in 258. angeführten Klangzerlegungsmethoden, die Flasche mit dem Membranboden,
itenreiter u. s. w.; solche Methoden sind optische Analysen. Es gibt jedoch auch
otische Analyse, welche es möglich macht, alle Partialtöne eines Klanges gleichzeitig
n, die Flammenanalyse von König (1865), deren Grundgedanke schon in 250.
ben wurde. Zum Verständnisse derselben kann Fig. 162 dienen. Wenn die Gas-
e und der Spiegel
je sind, so sieht man
n Spiegel ein ein-
Bild der Flamme;
r der Spiegel in ra-
Drehung, so erscheint
ild jeden Augenblick
ier anderen Stelle,
eint rasch über den
el hinzulaufen, und
einen feurigen Strei-
on der Breite der
menhöhe und von der
der Spiegelbreite,
wie eine im Kreise
ungene glühende Kohle
eurigen Kreis erzeugt.
nun die Flamme
och aufzuckt, so wird
ld während einer Auf-
g fortwährend länger
um kürzer, der feurige
en enthält einen brei-
rigen Zacken, dessen
um so kleiner ist, je

Fig. 162.



die Zuckzeit war; und zuckt die Flamme in regelmäßigem Tempo auf, so entstehen
er Secunde so viele feurige Zacken, als die Flamme Zuckungen macht; der obere Theil
lamme gewährt dann den Anblick von Fig. 163. Statt des Mundstücks in Fig. 162
nn auch ein auf c abgestimmter Resonator vorhanden sein, vor welchem eine Stimm-
den reinen einfachen Ton c erzeugt; dieser Ton pflanzt sich dann durch die Röhre
nd versetzt in derselben Weise, wie durch den Resonator unser Trommelfell angeregt

wird, die zarte Membran, welche die Flammenkapsel nach der Röhre zu abschließt, in Schw.; jede Einwärtsbewegung der Membran übt auf das Gas in der Kapsel einen Druck aus, stößt

Fig. 163.

Fig. 164.

es heftiger aus dem Brenner und erzeugt eine Zuckung der Flamme; es entstehen folglich so viele Zuckungen, als der Ton Schw. enthält; die Flammenbilder der Töne geben uns also auch die Schwz. der Töne und die Verhältnisse der Intervalle zu erkennen; so entstehen durch den Ton g_1, der 3 mal so viel Schw. als c enthält, für jeden Zacken des letzteren Tones deren 3, wie die Fig. 163 angibt. Königs manometrischer Flammenapparat enthält zahlreiche Resonatoren über einander, die mit einer Reihe von Flammenkapseln verbunden sind, vor welcher ein langer Spiegel rotirt; wird nun irgend ein Klang angegeben, so zucken alle diejenigen Flammen, deren Resonatortöne in dem Klange enthalten ist; die Bilder dieser Flammen werden zackig, während die übrigen in Streifenform verbleiben; man kann also mittels eines solchen Apparates die Partialtöne eines Klanges sammt ihren Schwz. sehen. Indessen ist dies auch mittels des einfachen Apparates (Fig. 162) nach einiger Einübung möglich. Werden mittels der Röhre die 2 Töne c und g_1 in die Flammenkapsel geleitet, so theilt sich jede breite Zuckung des c noch in 3 feinere des g_1; die entstehenden Flammenbilder erscheinen dann in den 6 verschiedenen Formen der Fig. 164, welche leicht erkennen lassen, daß sie von einem Grundtone in Verbindung mit seinem zweiten Obertone

Fig. 165.



herrühren. Erzeugen nun alle Klänge eines Instrumentes solche ähnlichen Flammenbilder, so lassen diese deutlich ersehen, daß in jenen Klängen immer der Grundton mit seinem zweiten Obertone gemischt ist, zerlegen also den Klang sichtbar in seine Partialtöne. Da für jedes Instrument der Klang aller Töne durch dieselbe Tonmischung entsteht, so hat auch jedes Instrument seine bestimmte Flammenfigur, die zwar vergrößert oder verkleinert bei tieferen oder höheren Tönen, aber immer in geometrischer Aehnlichkeit auftritt und dem Kundigen sofort die Tonmischung sichtbar macht. Die Theile von Fig. 165 geben die durch jenen Apparat erzeugten Flammenbilder der in die Röhre gesungenen über den einzelnen Reihen angegebenen Vocale (v. Zahn, Leipzig 1871), und zwar wurden die Vocale auf den links angegebenen Tönen einer Baßstimme gesungen. Es ist leicht zu ersehen, daß den Flammenbildern eines und desselben Tones für die verschiedenen Vocale die geometrische Aehnlichkeit fehlt, woraus der Helmholtz'sche Satz ersichtlich ist, daß ein Vocal nicht durch Mischung eines Grundtones mit einer und derselben Zahl seiner Obertöne allein entsteht. Dagegen ist zu ersehen, daß z. B. für den Vocal A die 3 Hauptzacken des Grundtones c sich in je 5 Zacken zerlegen, daß also dieser Grundton c auf A gesungen seinen 4ten Oberton e_2 enthält; bei dem Grundtone e theilt sich jeder Hauptzacken in 4 Zähne, zeigt also das Vorhandensein desselben Tones e_2, des dritten Obertones von e an; auch im Tone g enthält der Vocal A diesen bestimmten Oberton e_2, denn jeder Zacken des g ist in 3 Theile getheilt, und e_2 enthält nahezu 3mal so viel Schw. als g; ebenso zeigte jeder andere gesungene Vocal A durch sein Flammenbild an, daß dem Grundtone immer der Bestimmungs-Ton e_2 zugemischt war. Wenn nun auch Helmholtz b_2 als den Bestimmungs-Ton des Vocals A angibt, so beweisen doch diese Versuche die Wahrheit des Satzes, daß der Vocalcharakter durch einen Bestimmungston erzeugt wird; bei dem betreffenden Sänger war offenbar wegen seiner dunkeln sächsischen Aussprache des Vocals A der Bestimmungston tiefer als in dem norddeutschen hellen A.

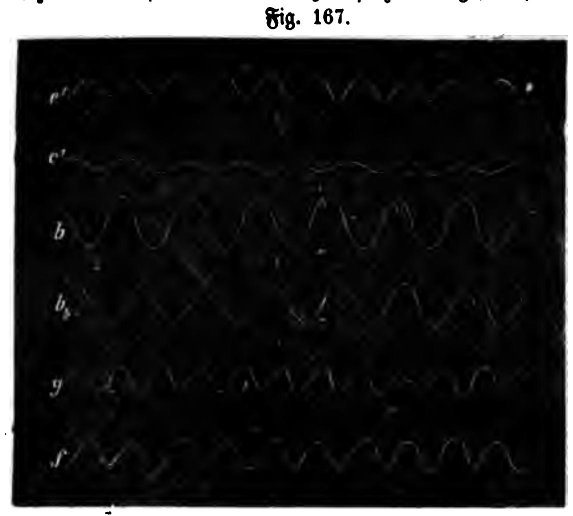
Schon Willis war (1832) dem einen Element der Helmholtz'schen Vocaltheorie, nämlich dem Bestimmungstone, nahe gekommen; er sagte: das den Vocal Bestimmende ist ein höherer mit dem Grundtone leise erklingender Ton, dessen Mischung zu jenem den Vocaleindruck bildet; W. construirte eigens dafür eine Zungenpfeife, deren Pfeifenton nicht mit dem Zungenton stimmte und durch Verlängerung der Pfeife beliebig verändert werden konnte; durch Mischung dieses schwachen Pfeifentones mit dem stärkeren Zungentone erzeugte W. vocalähnliche Klänge. Hierdurch angeregt suchte H. Graßmann sein Ohr einzuüben, die höheren Töne eines Vocals ohne künstliche Hilfsmittel wahrzunehmen. Nach vieljährigen Forschungen kam er zu folgenden Resultaten: der Vocal U entsteht durch Zumischung eines Obertons zu dem Grundtone; am reinsten ist das U, wenn der erste Oberton zugemischt ist; ein höherer Oberton macht das U mehr und mehr dem Ü ähnlich, bis es bei c_3 ein reines Ü wird; je höher nun der zugemischte Oberton weiter ist, desto mehr nähert sich der Klang dem J, bis er bei e_4 in ein reines J übergeht. Der Vocal A entsteht durch Zumischung der ganzen Reihe von Obertönen bis zur dritten Octave, während O in der Mitte zwischen A und U, Ö zwischen A und Ü, und E zwischen A und J bezüglich der Obertöne liegt. Da diese Resultate nur in dem Programm des Gymnasiums zu Stettin (1854) abgedruckt waren, blieben sie unbekannt, bis (1877) „die physikalische Natur der Sprachlaute" von G. erschien, in der auch die Consonanten betrachtet wurden. Sie nähert sich dem zweiten Element der Helmholtz'schen Vocaltheorie darin, daß eine Verstärkung einer gewissen Zahl von Obertönen für die Vocalbildung verlangt wird, und auch dem ersten Element, dem Bestimmungstone, durch die Höhenabgrenzung dieser Obertöne. Beide Elemente nun verwarf Quanten (1874), den

Fig. 166.



Bestimmungston, weil man sonst z. B. kein hohes U singen könne, und die Verstärkung bestimmter Obertöne, weil diese den Timbre-Wechsel hervorbringe u. s. w. Zur Erforschung des letzten Einwurfes wurden unter Helmholtz' Leitung (1877) neue Versuche von Auerbach angestellt über die Stärke der Partialtöne der Vocale, theils durch Hören mit Resonatoren, theils an König'schen Flammenbildern, theils an den farbigen Resonanzfiguren flüssiger Membrane; es ergab sich allerdings, daß beim dunklen Timbre die Intensität der Obertöne rasch, beim hellen Timbre langsam abnimmt, daß aber dennoch jedem Vocal eine charakteristische Reihe verstärkter Obertöne zukommt, die beim U und O bald aufhört, bei J und E sich aber sehr weit erstreckt. Zu gleichen Ergebnissen führten die Forschungen von Jenkin und Ewing (1878) mittels des Phonographen; die Schwingungseindrücke der in denselben eingesungenen Vocale wurden mehrhundertfach vergrößert und mathematisch zerlegt; Fig. 166 stellt die Phonogramme des auf die nebenstehenden Noten gesungenen Vocals O, Fig. 167 die des Vocals U dar, die Abscissen 7fach, die Ordinaten 400fach vergrößert; die Wellen des U sind fast pendelartig einfach, die des O zusammengesetzt. Im O traten der erste und zweite Partialton stark hervor, im U der erste oder zweite; fiel beim O ein Partialton auf $b_{,}$, so war er besonders stark; dieselbe Erscheinung zeigte im U ein Partialton in der Gegend von a. Obwohl dies stark auf den Bestimmungston hinweist, so hielten dennoch jene Forscher den Vocalcharakter für eine ausschließliche Folge der verstärkten Obertöne, da in den Schwingungscurven sich keine Hindeutung auf den Bestimmungston erkennen ließ, und weil der Vocal eines Phonographen bei schnellerer oder langsamerer Drehung derselbe blieb, welche Constanz indeß von Croß sofort bestritten wurde. Auch Schneebeli (1878 und 1879) schloß aus mehrfacher vergrößerter Darstellung und Berechnung der Membranschwingungen der Vocale, daß das Charakteristische der Vocalklänge in der Ordnungszahl der verstärken Theiltöne liege, bestätigt also diesen Theil der Helmholtz'schen Theorie; die absolute Tonhöhe schließt er aus, obwohl seine künstliche Darstellung der Vocale durch die verschieden geformte hohle Hand vor einem stark tönenden Telephon eher für den Bestimmungston zu sprechen scheint. Wahrhaft großartig sind die Versuche von Preece und Stroh (1879), die zunächst ebenfalls die Schwingungscurven der Vocale durch Membrane aufzeichnen ließen und aus ihnen die Partialtöne bestimmten; sodann construirten sie eine „synthetische Curvenmaschine", welche die Wellenlinien der einzelnen Partialtöne vereinigte; da hierdurch die bekannten Schwingungscurven der Vocale wieder entstanden, so war damit die Richtigkeit der Partialtöne bewiesen. — Endlich bauten sie den „automatischen Phonograph", mittels dessen durch drehbare Räder oder Walzen nach den Formen der Schwingungslinien geschnitten die Partialtöne einzeln erzeugt, aber auch gemischt werden konnten, wodurch künstliche Vocale entstanden. Nach diesen Forschungen ist U charakterisirt durch die Partialtöne 1, 2, 3, der Vocal O durch 1, 2, 3, 4; A durch 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8; E durch 1, 3, 8; J durch 1, 2, 8, 16; indessen gestehen die Forscher zu, daß die künstlichen Vocale unvollkommen, daß also ihre Forschungen noch nicht abschließend seien; auch erwähnen sie, daß der Vocal U bei rascherem Drehen des automatischen Phonographen dem O ähnlich werde, ebenso das O dem A u. s. w.; hierdurch wird abermals auf die Bestimmungstöne hingewiesen, auf welche auch Bourseul 1878 zurückkommt, indem er die Bestimmungstöne der wichtigsten französischen Vocale in dem c-dur-Accord findet. Diese die Physiker der ganzen Erde bewegende Frage fesselte auch schließlich den berühmten Erfinder des Telephons, Graham Bell (1879) und nach 3 Methoden suchte er sie zu lösen. Aus den Resonanztönen der Mundräume schloß er auf den Bestimmungston, aus den Curven des Phonautographen auf die verstärkten harmonischen Obertöne; als er aber das A eines Phonographen bei starker Verlangsamung der Drehung in U und bei starker Beschleunigung in E übergehen hörte, blieb ihm kein Zweifel, daß die absolute Ton-

Fig. 167.



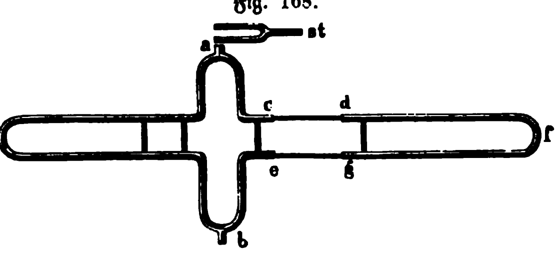
höhe, der Bestimmungston bei der Vocalbildung ungleich wesentlicher mitwirke als die Verstärkung der Obertöne. — König hat (1882) nachzuweisen gesucht, daß bei der Klangbildung auch die Nebentöne, die er Partialtöne nennt, mitwirken, was natürlich der Helmholtz'schen Theorie entspricht, daß aber auch die Phasendifferenz im Spiele sei, was Bissing (1883) durch Versuche entkräftet.

b. Der Zusammenklang.

Interferenz des Schalles. Wenn sich zwei Töne nach gleicher Richtung fortpflanzen, und wenn ihre Verdichtungswellen auf einander fallen, wie auch ihre Verdünnungswellen, was der Fall ist, wenn die Töne von gleicher Höhe sind, und wenn ihre Erregungsstellen um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen, so verstärken (nach 226.) die Wellen einander, der Ton wird stärker. Fällt aber immer eine Verdichtung des einen Tones mit einer Verdünnung des anderen zusammen, was stattfindet, wenn die Erregungsstellen gleich hoher Töne um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, so schwächen sich die beiden Töne, ja sie heben bei gleicher Stärke einander auf. Doch ist hierbei vorausgesetzt, daß die Töne einfach seien; sind Obertöne mit denselben verbunden, so wird in dem letzten Falle der Klang nicht ganz verlöscht, der Grundton verschwindet, Obertöne bleiben; ist z. B. der Abstand der Erregungsstellen = $1/2$ Wellenlänge des Grundtones, so ist er = 1 Wellenlänge der Octave, des ersten Obertones; wird also der Grundton aufgehoben, so wird der erste Oberton verstärkt; deßhalb springt bei manchen Interferenzen an der Stelle des verschwindenden Grundtones die Octave stark hervor. 265

Nachweise. In dem Röhrenapparate (Fig. 168) ist der Theil dfg ausziehbar. Wird derselbe soweit ausgezogen, daß cd entweder = 0, oder = $1/2, 2/2, 3/2 \ldots$ der Wellenlänge des Tones der Stimmgabel st ist, so hört man bei b den Ton deutlich, wenn auch die Röhren a und b viel länger sind. Beträgt aber cd = $1/4, 3/4, 5/4 \ldots\ldots$ Wellenlänge, so ist der Stimmgabelton bei b vollständig verschwunden. — Stefan (1868) hat den Apparat zur sichtbaren Darstellung der Interferenz von Longitudinaltönen benutzt; er befestigte an beiden Oeffnungen Glasröhren, die leichten Korkstaub oder dergl. enthalten und beide durch Korkstöpsel geschlossen sind. In die eine Röhre bringt durch den Stöpsel ein Glasstab wie eine Kolbenstange durch eine Stopfbüchse, und endigt in einem Korkkolben, der mit dem Stabe verschoben werden kann. Reibt man nun den Stab, so entstehen die bekannten Wellenfiguren in der Röhre des Korkes; in der zweiten Röhre bilden sie sich ebenfalls, wenn cd = $1/2, 2/2, 3/2 \ldots$ von der Wellenlänge des Tones ist; dagegen bleiben die Stäubchen in der zweiten Röhre ganz ruhig, wenn cd = $1/4, 3/4, 5/4 \ldots$ von der Wellenlänge ist. — Hält man eine Gabelröhre, deren gemeinschaftliche obere Röhre durch eine mit Sand bestreute Membran geschlossen ist, mit ihren zwei unteren Oeffnungen zu beiden Seiten einer Knotenlinie über benachbarte Theile einer tönenden Scheibe, so hüpft der Sand nicht; liegen aber zwischen den Oeffnungen zwei Knotenlinien, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung. — Bläst man eine Helmholtz'sche Doppelsirene an, wenn die Löcher des oberen und des unteren Rades correspondiren, so wird der Ton verstärkt; wenn aber die Löcher des einen Rades mit den Zwischenräumen des anderen correspondiren, so verschwindet der Grundton und die Octave erscheint. — Zwei gleiche, neben einander stehende gedeckte Pfeifen wirken so auf einander, daß die Luft in die eine strömt, wenn sie aus der anderen tritt; die Töne sind daher in entgegengesetzten Phasen, sie verstärken sich nicht, sie bilden nur ein Sausen; bei offenen Pfeifen entsteht die Octave.

Fig. 168.

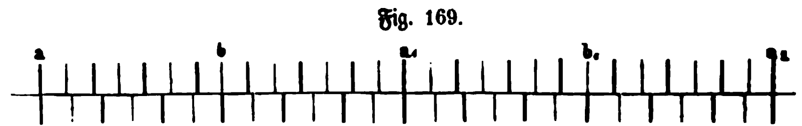


Die Schwebungen (Scheibler 1814). Sind zwei gleichzeitig erklingende Töne nicht von gleicher Höhe, aber doch von geringem Höhenunterschiede, so entstehen abwechselnde Anschwellungen und Verminderungen der Tonstärke, welche man 266

Schwebungen nennt; die Anschwellungen nennt man Stöße oder Schläge, die Verminderungen Pausen, da sie häufig bis zum Verlöschen gehen. **Die Zahl der Schwebungen ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne** (Scheiblers Gesetz der Schwebungen).

Die Entstehung der Schwebungen und Scheiblers Gesetz folgen leicht aus Fig. 169; die dicken Striche stellen die Bergmitten, die feinen die Thalmitten, der obere Wellenzug die

Fig. 169.



kürzeren Wellen des höheren Tones, der untere die längeren Wellen des tieferen Tones dar. An irgend einer Stelle a müssen die Bergmitten der beiden Wellenzüge zusammentreffen und Verstärkung, einen Stoß bewirken. Die folgenden Berge treffen dann wegen der verschiedenen Wellenlängen nicht mehr zusammen, der Berg der längeren Welle eilt dem der kürzeren immer mehr voraus, so daß allmälig das Thal der kürzeren über den Berg der längeren gelangt; wo der höhere Ton eine halbe Welle mehr gebildet hat, also bei b, treffen Berg und Thal direct aufeinander, heben sich auf und bewirken eine Pause. Ein Stoß, bei a_1, findet erst wieder statt, wenn der höhere Ton eine ganze Welle mehr gebildet hat als der tiefere; also ist die Zahl der Stöße gleich der Differenz der Anzahl der Wellen, gleich der Differenz der Schwingungszahlen.

Nachweise. Appunns Tonmesser hat 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schw. mehr gibt als die vorhergehende; man hört daher beim Anblasen von je zwei neben einander liegenden Zungen 4 Stöße, dagegen 8, 12, 16 ....., wenn zwischen zwei tönenden Zungen 1, 2, 3 .... ruhende liegen. In den Pausen ist indeß hier keine Ruhe. Schweigende Pausen erhält man mit 2 ganz gleichen Stimmgabeln, von denen man die eine mit Wachs beklebt, oder mit gleichen gedeckten Pfeifen, von denen man die eine verstimmt, indem man nur die Hände vor das Mundloch hält oder die Lappen biegt oder den Deckel verschiebt. Klaviertöne schweben, wenn eine Saite eines Tones gegen die andere verstimmt wird. Scheiblers Gesetz ist am leichtesten nachzuweisen mit der Doppelsirene von Helmholtz, an welcher man den Windkasten des einen Rades ebenfalls drehen kann; bei jeder Drehung entstehen so viele Schwebungen, als die Luftstöße der einen Sirene auf die Löcherzwischenräume des anderen Rades treffen. — Für das Auge wahrnehmbar lassen sich die Schwebungen auf mehrere Arten machen. Auf dem Phonautograph erhält man von zwei schwebenden Tönen eine Wellenlinie mit abwechselnd sehr hohen und kaum merklichen Bergen. — Befestigt man bei Lissajous' Lichtversuch (235.) den zweiten Spiegel ebenfalls an einer Stimmgabel, die ein wenig gegen die erste Gabel verstimmt ist, aber parallel zu derselben steht, so erhält man auf der Tafel eine abwechselnd steigende und fallende Lichtwelle. — Am schönsten aber sind die Schwebungen gleichzeitig zu hören und zu sehen mit Königs Interferenzflammenzeiger. Zwei gleiche Pfeifen stehen neben einander und sind mit Membrangehäuschen versehen, die mit einem und demselben Brenner und mit einem Gasreservoir verbunden sind. Die Flamme tanzt im Tacte nach den Schlägen hin und her, die man leicht durch Verstimmen der einen Pfeife erzeugen kann. In dem Spiegel erscheint bei dessen Drehung das Flammenbild bald in einzelne kleine Flammen getrennt, bald als zusammenhängender Berg. Am einfachsten lassen sich die Stöße für eine ganze Schulklasse hörbar darstellen mit einem Harmonium oder durch die Schmidt'schen Pfeifen, zwei Glaspfeifchen, die man neben einander in den Mund steckt und anbläst; bei diesem Einklang geben sie keine Stöße; führt man nun in die eine ein kleines Kölbchen ein, so entstehen die Stöße, die sich durch Verschieben des Kölbchens schneller und langsamer darstellen lassen.

Die Stöße wurden schon von Scheibler zum Stimmen vorgeschlagen. Hat man für jeden zu bestimmenden Ton zwei Gabeln, von denen die eine 4 Schw. per Sec. mehr, die andere 4 weniger als der zu stimmende Ton erzeugt, so ist dieser Ton auf seiner richtigen Höhe, wenn er mit jeder der beiden Gabeln 4 Stöße gibt. — Auch zum Bestimmen der Schwz. von a hat Scheibler die Stöße benutzt; er verschaffte sich 56 Gabeln, welche von a bis a_1 so fortschritten, daß jede folgende 4 Stöße mit der vorhergehenden gab; hieraus folgte, daß $a_1 - a = 2a - a = a = 55 . 4 = 220$ Schwingungen. Aehnlich ist Appunns Tonmesser eingerichtet, den man auch zur Bestimmung der absoluten Schwz. eines Tones benutzen kann, indem man die Schwebungen zählt, die zwischen dem fraglichen Tone und einem der Zungentöne des Apparates stattfinden; die gesuchte Schwz. ist dann gleich der Schwz. des Zungentones vermehrt um die Zahl der Stöße. — Am vollkommensten ist Scheiblers Idee durchgeführt in Königs Tonmesser (1867), bestehend aus 331 Gabeln und

36 Stäben für alle Töne von c_{-3} bis c_6. — Einer ganzen Schulklasse kann die Bestimmung der Schwzn. mit einem Harmonium gezeigt werden: man schlägt c und cis an und zählt die Schwebungen, ebenso cis—d u. s. w. Die Summe aller Schwebungen in einer Octave ist die Schwz. des Grundtones.

König hat (1875) gefunden, daß irgend ein Grundton nicht blos mit einem ihm nahe liegenden Tone Stöße erzeugt, sondern auch mit solchen Tönen, die den harmonischen Obertönen des Grundtones nahe liegen. Hat man z. B. eine dauernd tönende Stimmgabel C von 64 Schw. und läßt dieselbe nach und nach mit andern stufenweise höher tönenden Stimmgabeln zusammentönen, so hört man anfänglich, bei völlig gleicher Stimmung keine Schwebung; nach dem Verlassen des Einklanges entstehen langsame Schwebungen, die allmälig schneller werden, zwischen D und E in ein Rollen übergehen, das jenseits der Quart (bei 22 Schwebungen) zu einem verworrenen Gerassel wird, bei der Sexte wieder in den Charakter des Rollens zurückkehrt, das sich allmälig verlangsamt, so daß man nahe bei der Septime 12 bis 10 Stöße zählen kann, die bei der Septime sich zur Zahl 8 vermindern und nach weiterer Verminderung endlich ganz aufhören, was der Fall ist, wenn der zweite Ton mit der Octave des ersten zusammenfällt; die Zahl dieser oberen Stöße ist gleich der Differenz zwischen der Octave des tieferen Tones und dem höheren Tone. Derselbe Vorgang wiederholt sich, wenn der zweite Ton allmälig von der Octave zur Quinte derselben übergeht, aber auch beim Uebergange von der Quinte zur zweiten Octave u. s. w. Die Stöße eines Grundtones mit einem den Obertönen naheliegenden Tone werden zwar mit der Höhe des Obertones schwächer, können jedoch selbst noch beim 10ten Obertone wahrgenommen werden. Allgemein: ist die Schwz. eines Tones n, die eines andern $hn + m$ oder $(h + 1)n - m'$, so entstehen zwischen den zwei Tönen m oder m' Stöße, wie groß die ganze Zahl h auch zwischen 1 und 10 sein möge. Alle Stöße dieser Art erzeugen auch bei hinreichender Anzahl, etwa 16, Stoßtöne, wie überhaupt 16 Impulse jeder Art einen Ton hervorbringen, was jedoch Helmholtz nicht zugibt.

267 **Die Rauhigkeit des Zusammenklanges.** Die Anzahl der als solche hörbaren Schwebungen ist nach den Forschungen von Helmholtz größer, als man bisher annahm; 4, 8, 12 in der Secunde können noch deutlich gezählt werden; in einer größeren Anzahl kann man sie zwar nicht mehr einzeln unterscheiden, sie verschmelzen auch nicht zu einem Stoßtone, man empfindet sie vielmehr als eine fortwährende Unterbrechung des Tonflusses, als eine Rauhigkeit, welche nach Helmholtz bei 30—40 Schwebungen am unangenehmsten auf das Gehör wirkt; doch ist auch noch eine größere Zahl von Schwebungen in einem Intervall bei einiger Uebung zu erkennen und wird deßwegen auch von dem ungeübten Ohre empfunden; aber die Schwebungen werden immer undeutlicher, je größer ihre Zahl wird, und zwar wohl deßhalb, weil unsere Empfindung durch eine zu große Zahl gleicher Einwirkungen in sehr kurzer Zeit für dieselbe abgestumpft wird; nach Helmholtz soll die Grenzzahl der wahrnehmbaren Schwebungen bei 132 in der Secunde liegen. Dies ist einer der Gründe, warum die Haupttöne eines großen Intervalls keine Schwebungen zu Gehör bringen; denn für solche ist die Differenz der Schwingungszahlen sehr groß. Ein zweiter Grund dafür liegt in der Art, wie das Ohr die Schwebungen zur Wahrnehmung bringt. So wie nämlich die Schwebungen auf einer Membran sichtbar werden, so treten sie auch in dem Trommelfelle, in den Gehörknöchelchen, in den Corti'schen Fasern auf, weil diese Werkzeuge nicht ausschließlich auf einen Ton abgestimmt sind, sondern auch die Wirkung zweier Töne auf einander in sich aufnehmen. Indessen wirken doch auf jede Corti'sche Faser nur wenige, nahe beisammen liegende Töne mit annähernd gleicher Kraft; weiter von diesen entfernt liegende Töne regen dieselben nur sehr schwach an; folglich können auch nur die Schwebungen kleiner Intervalle sich ungestört in den Corti'schen Fasern wiederspiegeln; von einem großen Intervall mag wohl der eine Ton stark einwirken; der andere wird aber dann jedenfalls in der betreffenden Faser nur schwach auftreten, kann also auch nur schwache Schwebungen erzeugen. Wenn demnach das große Intervall $c_{-1}\ g_{-1}$ auch ebenso wohl 33 Schwebungen gibt wie das kleine $h_1\ c_2$, so sind die ersteren doch viel schwächer als die letzteren. Die Rauhigkeit des Zusammenklanges hängt folglich in

einer zusammengesetzten Weise von der Größe des Intervalls und von der Zahl der Schwebungen ab.

Sehr hohe, kleine Intervalle klingen wegen allzugroßer Zahl der Schwebungen und sehr tiefe wegen zu geringer Zahl derselben weniger rauh als mittlere; tiefe, größere Intervalle geben zwar mehr Schwebungen, die aber eben der Größe des Intervalls wegen weniger hörbar sind; noch mehr Schwebungen geben gleiche Intervalle von mittlerer Lage, die deßhalb eine feinere und schärfere Rauhigkeit und eine größere Empfindlichkeit gegen das Verstimmen haben, als dies bei den tieferen Tönen der Fall ist, deren Rauhigkeit mehr dem Knarren ähnlich ist. Sehr tiefe Töne klingen schon für sich rauh, einmal weil man häufig die einzelnen Schwingungen als Stöße empfindet, und dann weil sie mit ihren eigenen Obertönen oder durch diese unter sich Schwebungen erzeugen. Die hohen, starken Baßtöne der menschlichen Stimme haben außerdem die hohen, nahe beisammen liegenden Obertöne von d_4 bis g_4, auf welche die Länge des Gehörganges abgestimmt ist, und die deßhalb sehr starke, unangenehme Schwebungen hervorbringen; für die höheren Stimmlagen des Menschen dagegen geben die höchsten Obertöne sehr viele und daher verschwindende Schwebungen; die höheren Menschenstimmen klingen deßwegen durchschnittlich angenehmer als tiefe. Werden Schwebungen in geringer Zahl sparsam angewendet, so bringen sie des Wankens der Töne wegen den Eindruck der Vergänglichkeit, eine trübe, melancholische Stimmung hervor; das Tremoliren der Singstimmen, der Violinen und Zithern, das Beben eines Orgelklanges, wenn demselben ein naheliegender Ton beigesellt wird, erzeugt diese Wirkung, die indessen bei langer Dauer oder öfterer Wiederholung unangenehm wird.

c. Die Consonanz und Dissonanz.

268 Die Rauhigkeit des Zusammenklanges ist die Ursache der Dissonanz; denn diese Rauhigkeit besteht aus einer größeren Anzahl von Schwebungen, aus einem sehr raschen Wechsel von Anschwellungen und Schwächungen des Tones, aus einer rasch intermittirenden Wirkung auf die Gehörnerven. Jede zahlreich intermittirende Wirkung auf die Nerven wird aber bald unerträglich; wenn ein einziger elektrischer Schlag uns auch nur wenig empfindlich berührt, so ist doch eine rasche Folge gleicher Schläge kaum auszuhalten; Kitzeln, Kratzen kann bis zum Rasendwerden aufregen. Nichts wirkt unangenehmer und schädlicher auf das Auge, als ein rasches Verlöschen und Aufflammen, als das Flackern eines Lichtes; eine der schwersten Torturen soll in stundenlangem Aufschlagen von Wassertropfen auf den Kopf aus einiger Höhe bestanden haben. So wirkt auch eine nicht zu kleine und nicht zu große Anzahl von Schwebungen empfindlich auf das Gehörorgan; bei 30 bis 40 per Sec. ist die Wirkung am unangenehmsten. Schwebungen entstehen aber nicht blos durch das Zusammenklingen zweier nahe beisammen liegenden Grundtöne, sondern auch durch die Obertöne unter einander und mit den Grundtönen, sowie durch die Combinationstöne. *Die Dissonanz besteht in der Rauhigkeit des Zusammenklanges, welche bei Intervallen von verwickeltem Schwingungszahlenverhältnisse durch die schnellen Schwebungen der Grundtöne, der Obertöne und der Combinationstöne erzeugt wird.* Die Consonanz der Intervalle von einfachem Schwingungszahlenverhältnisse dagegen beruht darin, daß die Obertöne dieser Intervalle entweder ganz oder theilweise zusammenfallen und daher keine oder nur wenige und schwache Schwebungen hervorrufen.

Beweis. Am einfachsten kommen sämmtliche Erscheinungen der Consonanz und Dissonanz zur Klarheit, wenn wir die zwei Grundtöne der einfachsten Intervalle sammt ihren Obertönen, wie es in der folgenden Uebersicht geschehen ist, so zusammenstellen, daß immer die gleichen Töne unter einander stehen.

1. Einklang	c	c_1	g_1	c_2	e_2	g_2	b_2	c_3	d_3	e_3	fis_3	g_3
od. Prime.	c	c_1	g_1	c_2	e_2	g_2	b_2	c_3	d_3	e_3	fis_3	g_3
		2										
2. Octave.	c	c_1	g_1	c_2	e_2	g_2	b_2	c_3	d_3	e_3	fis_3	g_3
	c_1	c_1		c_2		g_2		c_3		e_3		g_3
		1										

3

3. Quinte. } c c_1 g_1 c_2 e_2 g_2 b_2 c_3 d_3 e_3 fis_3 g_3
} g g_1 d_2 g_2 h_2 d_3 f_3 g_3

2

4

4. Quarte. } c c_1 g_1 c_2 e_2 g_2 b_2 c_3 d_3 e_3 fis_3* g_3
} f f_1 c_2 f_2 a_2 c_3 es_3 f_3 g_3

3

5

5. Terz. } c c_1 g_1 c_2 e_2 g_2 b_2 c_3 d_3 e_3 fis_3 g_3
} e e_1 h_1 e_2 gis_2 h_2 —d_3 e_3 fis_3

4

Nennen wir einen Grundton mit sammt seinen Obertönen die Theiltöne eines Klanges, en Grundton den ersten Theilton, den ersten Oberton den zweiten Theilton u. s. w., so ıssen sich die Eigenschaften der vorstehenden Intervalle leichter aussprechen. In dem Einange fallen alle Theiltöne zusammen; ebenso fällt in der Octave jeder Theilton des öheren Klanges auf einen Theilton des tieferen; ganz dasselbe findet auch für die Quinte er Octave, überhaupt für alle solche Intervalle statt, deren einer Klang ein Oberton des nderen ist; nur wird bei größeren Intervallen der Unterschied zwischen Consonanz und Dissonanz immer mehr verwischt, und in den Octaven wird durch Beimischen höherer Obertöne der Klang etwas verschärft. Die genannten Intervalle sind absolute Consonanzen. — In der Quinte fallen innerhalb der oben angegebenen Grenzen 4, in der Quarte 3, in der Terz auch 3 Obertöne zusammen; bei der Quinte sind es aber tiefere ls bei der Quarte, und bei der Terz sind sie besonders viel höher als bei der Quarte. Folglich sind Quinte und Quarte bessere Consonanzen als die Terz. Besonders wichtig sind ie ersten coincidirenden Theiltöne, deren Ordnungszahl durch die darübergesetzten Ziffern rkennbar ist; bei dem Einklange sind es 1—1, bei der Octave 2—1, bei der Quinte 3—2, ei der Quarte 4—3, bei der Terz 5—4, kurz dieselben Zahlen, die auch in dem Schwingungszahlenverhältnisse vorkommen. Je tiefer diese zuerst auf einander schlagenden Theiltöne ind, desto stärker sind sie, desto mehr wirken sie also auch consonirend; desto deutlicher aber verden außerdem die langsamen Schwebungen, die durch eine Unreinheit des Intervalls ntstehen, desto deutlicher ist also auch jede Unreinheit zu erkennen, desto schärfer ist die Consonanz des Intervalls abgegrenzt; auch hierin sind die Quinte und die Quarte der Terz überlegen; außerdem die Quarte noch darin, daß sie mit der Octave eine Quinte, also eine bessere Consonanz bildet, während die Terz mit der Octave eine kleine Sexte, eine schlechtere Consonanz erzeugt. Endlich haben wir unser Augenmerk noch auf die nicht zusammentreffenden Töne zu richten; bei der Quinte liegen dieselben vor dem ersten zusammentreffenden Tone weit auseinander, bei der Quarte bilden f_1 und g_1 einen ganzen Ton, bei der Terz h_1 und c_2 einen halben Ton; es bilden also bei der Terz zwei Theiltöne eine scharfe Dissonanz, weniger bei der Quarte, gar nicht bei der Quinte; noch mehr treten Dissonanzen bei noch höheren Theiltönen auf, doch sind dieselben wegen zu großer Schwäche der Theiltöne und zu großer Zahl der Schwebungen unhörbar. — Merkwürdig ist der Zusammenhang zwischen den Theiltönen eines Intervalls und denen des benachbarten, etwa um einen Halbton des einen Klanges erniedrigten Intervalls. Wird z. B. in dem Einklange der eine Ton erniedrigt, so werden damit auch alle Theiltöne desselben um eben soviel erniedrigt; sie sind jetzt alle von denen des anderen nur wenig verschieden, geben mit allen schnelle Schwebungen, also die schärfsten Dissonanzen; umgekehrt, wenn wir diese Dissonanz um einen Halbton erhöhen, so coincidiren dann alle Theiltöne, die vorher dissonirten. Gleiche Betrachtung für die übrigen Intervalle gibt allgemein den Satz: In jedem Intervall dissoniren diejenigen Obertöne, die in den benachbarten Intervallen zusammenfallen. „Man kann in diesem Sinne sagen, daß jede Consonanz durch die Nähe der in der Tonleiter benachbarten Consonanzen gestört wird, und zwar um so mehr gestört wird, je niedriger und stärker die Obertöne sind, welche das störende Intervall durch ihre Coincidenz charakterisiren, oder was dasselbe sagt, je kleinere Zahlen das Schwingungsverhältniß desselben ausdrücken.“ Die Quinte hat nun neben sich die Intervalle 7 : 5 und 8 : 5; diese können wenig oder gar nicht stören, weil der 7te und 8te Theilton schwach ausfallen oder ganz fehlen. Die Quarte wird gestört durch die Quinte und die Terz; die erste Störung ist gering, weil der Abstand ein großer ganzer Ton ist, die zweite kann unter Umständen bedeutend werden; daher ist über die Consonanz der Quarte lange Uneinigkeit unter den Musikern gewesen, die aber schon deßhalb unberechtigt ist, weil die Quarte durch Umkehrung zur Quinte wird. Der Quarte 4 : 3 steht die große Sexte 5 : 3 nahe, dieselbe verliert aber durch die Störung der Quinte, die nur um 10 : 9 absteht, an Werth als Consonanz, insbesondere aber dadurch, daß sie durch Umkehrung zur kleinen Terz wird. Die große Terz erfährt eine starke Störung durch die ganz nahe Quarte und die kleine Terz; sie steht aus diesem und den schon

angegebenen Gründen der Quarte weit nach; sie wurde im Alterthume auch als Dissonanz angesehen und erst zur Zeit Francos von Cöln (1200) wurde sie als unvollkommene Consonanz zugelassen. Helmholtz erklärt *Quinte und Quarte für vollkommene, große Terz und große Sexte für mittlere Consonanzen.* Die kleine Terz 6 : 5 und die kleine Sexte 8 : 5 haben nach obiger Regel bei der ersten Coincidenz die Theiltöne 6 und 8, welche häufig genug fehlen; ihre Verstimmungen rufen daher kaum wahrnehmbare Schwebungen hervor, sie entbehren der scharfen Abgrenzung; außerdem werden sie beide durch benachbarte Intervalle stark gestört, die kleine Terz durch die große und den Grundton, die kleine Sexte durch die Quinte und die große Sexte; die *kleine Terz* und die *kleine Sexte* sind *unvollkommene Consonanzen.* Nach der Einfachheit der Zahlenverhältnisse würden jetzt die natürliche Septime 7 : 4 und die verminderte Decime 7 : 3 zu betrachten sein, ja sogar der kleinen Sexte eigentlich vorangehen; die kleine Sexte hat aber darin einen Vorzug, daß ihre Umkehrung die große Terz ist, während die eben angeführten Intervalle durch Umkehrung noch schlechtere Intervalle geben, als sie selbst sind. Außerdem passen dieselben nicht in die Tonleiter, sind daher nicht in die Musik aufgenommen. Durch diese Auslassung entsteht hier eine Kluft hinter den Consonanzen, durch welche sie sich von den Dissonanzen scheiden. Die schärfsten Dissonanzen sind die kleine Secunde und die große Septime, weil sie durch die absoluten Consonanzen gestört werden; etwas weniger ist dies der Fall für die große Secunde und die kleine Septime, die daher weniger scharfe, aber immer noch starke Dissonanzen sind; die kleine Septime ist sogar die mildeste Dissonanz, weil außer der mäßigenden großen Entfernung sie auch noch ihre Dissonanz dem ersten, häufig nicht starken Obertone verdankt. Eine starke Dissonanz ist noch die übermäßige Quarte, da sie durch die beiden vollkommenen Consonanzen gestört wird.

Wenn hiernach der Unterschied zwischen den Consonanzen und den Dissonanzen auf die Schwebungen der Obertöne zurückgeführt ist, so würde die Folgerung natürlich sein, daß alle Intervalle von einfachen Tönen, wenn dieselben nicht gerade unter sich Schwebungen erzeugen, consonant sein müssen. Hier treten aber die *Combinationstöne* statt der Obertöne auf. Nähere Untersuchung zeigt, daß bei zusammengesetzten Klängen die ersten Differenztöne, auf die es hauptsächlich ankommt, in ihren Schwebungen mit den Obertönen übereinstimmen; folglich verstärken die Schwebungen der Combinationstöne die Dissonanzen und Consonanzen, und erzeugen sie, wo sie wegen Einfachheit der Töne eines Intervalls z. B. bei gedeckten Pfeifen nicht vorhanden sind; ja sie vermitteln auch die scharfe Begrenzung der Intervalle. Hat z. B. eine unreine Quinte die Zahlen 200 und 301, so gibt sie den Differenzton 101, der mit dem Grundtone den zweiten Differenzton 99 und mit diesem 2 Schwebungen bildet; ähnlich ist es bei der Octave und der Quarte; bei den Terzen und Sexten aber muß bis zum 4ten Differenztone gegangen werden, um Schwebungen zu erhalten; da diese wohl kaum wahrnehmbar sind, so behauptet Helmholtz und bestätigt es durch Versuche, daß unreine einfache Terzen und Sexten (für sich allein) z. B. bei gedeckten Pfeifen, Flaschen, Stimmgabeln ebenso gut klingen als reine, was natürlich sofort sich ändert, wenn andere Töne, andere Intervalle bildend, hinzutreten.

Nach Appunn wirken jedoch auch die Summationstöne und zwar besonders in der kleinen und eingestrichenen Octave, da sie hier überwiegend stark sind: sie wirken dissonirend z. B. in dem Intervall 8 : 5, da 13 zu beiden Tönen unharmonisch, consonirend z. B. in dem Intervall 6 : 4, da 10 zu beiden Tönen harmonisch ist. Einen neuen Beweis für die Helmholtz'sche Dissonanztheorie hat Preyer (1878) erbracht. Wenn zwei Grundtöne so weit von einander sind, daß sie selbst keine Stöße erzeugen können, wenn sie frei von Obertönen sind, also auch durch die Obertöne keine Stöße entstehen, und wenn endlich auch die Combinationstöne zu weit von einander und den Grundtönen entfernt sind, um Stöße bilden zu können, dann dürfen, wenn Helmholtz' Theorie richtig ist, auch die dissonantesten reinen Intervalle keine hörbare Dissonanz bilden. Diese Folgerung fanden Preyer und zahlreiche Hörer bestätigt, selbst wenn die tönenden Stimmgabeln die dissonanten Intervalle 10 : 13, 10 : 17, 11 : 13 u. s. w. darboten, der Zusammenklang wurde als Consonanz empfunden.

Die Principien der Consonanz erklären nach Helmholtz auch die Entstehung der *Tonleitern*; aus der Harmonie können dieselben nicht, wie man vielleicht nach 239. vermuthen könnte, ursprünglich entstanden sein, da die Melodie und die Tonleiter lange vor Erfindung der harmonischen Musik vorhanden waren. Die Töne der consonirenden Intervalle bilden aber auch für den, der ihre Consonanz nicht kennt, regelmäßige *Tonstufen in der Tonhöhe*, welche mit den regelmäßigen *Tonstufen in der Zeit*, dem Rhythmus, verbunden, die *Melodie* erzeugen; sie erscheinen auch dem Gehöre als verwandt, das ihre Consonanz noch nicht kennt, wie z. B. der Octavengesang der Frauen- und Männerstimmen die Octave als den verwandtesten Ton charakterisirt. Helmholtz nennt die Töne im ersten Grade verwandt, welche einen gemeinschaftlichen Theilton besitzen, und im zweiten Grade verwandt diejenigen, welche einem und demselben dritten Tone im ersten Grade verwandt sind; die Verwandtschaft des ersten Grades ist um so stärker, je näher die ersten oder der eine zu-

sammenenfallende Theilton dem Grundtone sind. Demnach ordnet sich die Verwandtschaft der Töne durch die darunter gesetzten coincidirenden Theiltöne in folgender Weise:

1. bei der aufsteigenden Octave

c_1	c_2	g_1	f_1	a_1	e_1	es_1
1 — 1	2 — 1	3 — 2	4 — 3	5 — 3	5 — 4	6 — 5

2. bei der absteigenden Octave

c_1	c	f	g	es	as	a
1 — 1	1 — 2	2 — 3	3 — 4	8 — 5	3 — 5	5 — 6

Ordnet man diese im ersten Grade verwandten Töne nach der Tonhöhe, so entstehen, wenn die letzten Töne der beiden Reihen, die mit den zweitletzten zu enge Intervalle bilden, wegfallen, folgende zwei Tonreihen:

1. $c_1 — e_1 — f_1 — g_1 — a_1 — c_2$,
2. c_1 — as — g — f — es — c oder aufsteigend geordnet
3. c — es — f — g — as — c_1.

Vervollständigt werden diese Reihen, wenn wir sie mit den Verwandten der Quinte g verbinden, die wir in Folgendem von c_1 an geordnet unter die Reihe setzen:

Verwandte von c_1 ... c_1 — — e_1 — f_1 — g_1 — a_1 — — c_2
Verwandte von g ... c_1 — d_1 — es_1 — — g_1 — — h_1 — c_2.

Durch Verbindung derselben entsteht 1. die vollständige aufsteigende Durtonleiter $c_1 — d_1 — e_1 — f_1 — g_1 — h_1 — c_2$, das lydische Geschlecht der Griechen, 2. die aufsteigende Molltonleiter

$c_1 — d_1 — es_1 — f_1 — g_1 — h_1 — c_2$.

Setzen wir ebenso unter die absteigende Reihe der Verwandten von c die absteigende Verwandtenreihe von g, jedoch nach c_1 geordnet:

Verwandte von c_1 .... c_1 — — as — g — f — es — — c
Verwandte von g .... c_1 — b — — g — — es — d — c,

so erhalten wir durch Verbindung: 3. die vollständige absteigende Molltonleiter c_1 — b — as — g — f — es — d — c, das äolische Geschlecht, und 4. die phrygische Tonleiter

c_1 — b — a — g — f — es — d — c.

Auch die übrigen in der alten Musik vorkommenden Tongeschlechter lassen sich durch Verbindung mit den Verwandten der Unterquinte f, also durch die Principien der Consonanz ableiten.

269 **Accorde.** Da in verschiedenen Klangfarben die Obertöne nach Zahl, Höhe und Stärke verschieden sind, so müssen auch die Consonanzen und Dissonanzen auf verschiedenen Instrumenten verschieden klingen; in den Instrumenten, die einfache Töne und Klänge mit wenigen Obertönen geben, klingen die Dissonanzen weich und mager, fast wie Consonanzen; daher sind in der modernen Musik, die einen überschwellenden Reichthum von Dissonanzen enthält, jene Instrumente für sich allein unbrauchbar; ein Concert von gedeckten Pfeifen würde uns bald einschläfern, „schrecklicher als ein Concert von einer Flöte ist ein solches von zwei Flöten." Im Gegensatze hierzu werden Accorde der obertönereichen Streichinstrumente leicht rauh und scharf, kommen daher auch selten langgezogen, sondern nur vorübergehend bei denselben vor.

Consonirende Accorde sind solche Verbindungen von 3 oder mehreren Klängen, von denen jeder mit allen übrigen consonirt; ihre Zahl ist gering: 1. Grundton, Terz und Quinte; 2. Terz, Quinte und Octave (Terzsextenaccord); 3. Quinte, Octave und Decime (Quartsextenaccord). Wird überall statt der großen Terz die kleine gesetzt, so entstehen die drei Moll-Dreiklänge, während jene die drei Dur-Dreiklänge heißen. Der Unterschied beider liegt in den Combinationstönen. Sucht man die Combinationstöne von Dur-Dreiklängen, so findet man, daß diejenigen der ersten Ordnung und selbst noch die stärkeren der zweiten Ordnung nur Verstärkungen der Einzeltöne des Accordes erzeugen; dagegen kommen durch die Combinationstöne der Moll-Accorde, selbst durch die der ersten, noch mehr aber durch die der zweiten Ordnung Töne in den Accord, die demselben ganz fremd sind und ihm daher etwas Unklares und Verschleiertes geben, worin das Eigenthümliche der Moll-Accorde liegt; außerdem bilden die höheren Combinationstöne scharfe, aber sehr schwache Dissonanzen.

270 **Optische Darstellung der Consonanzen.** Man hat die Consonanzen nach Lissajous' Methode auch optisch dargestellt. Sind zwei Stimmgabeln von gleicher Tonhöhe so befestigt (Fig. 170), daß ihre Schw. senkrecht zu einander erfolgen, so erzeugt ein von beiden Spiegelchen s und s' reflectirter Lichtstrahl auf der Tafel T im Allgemeinen eine Ellipse, die für den Fall, daß beide Gabeln gleichzeitig ihre Schw. beginnen und vollenden, in eine gerade Linie übergeht, in einen Kreis aber, wenn die eine Gabel um $^1/_4$ ihrer Schwingungszeit der anderen voraus ist. Die Entstehung dieser Fig. ist leicht erklärlich. Wird nun die eine Gabel durch Aufkleben eines Stückchens Wachs um ein wenig verstimmt, so ändert sich die Figur fortwährend, der Kreis geht durch eine immer schmäler werdende Ellipse in eine

Gerade und diese durch die sich verbreiternde Ellipse wieder in den Kreis über u. s. w. (Fig. 171), weil eben die Verschiedenheit der Schwingungszeit die drei ersten genannten Fälle abwechselnd herbeiführt. Denn sind die 2 Gabeln um 1 Schw. in 1 Sec. verschieden und beginnen sie z. B. mit gleicher Phase, so sind sie nach 1 Sec. wieder in gleicher Phase, nach ½ Sec. aber in entgegengesetzter Phase und nach ¼ und ¾ Sec. um ¼ und ¾ in der Phase verschieden. Dreht man den Spiegel, wenn auf der Tafel ein fester Kreis steht, so entsteht die Einklangsfigur b (Fig. 171); wenn dagegen die eine Gabel verstimmt ist, entsteht die Verstimmungsfigur c. Ist die eine Gabel die Octave der anderen, so entsteht, wenn der Grundton der Octave um ¼ seiner Schwingungsdauer voraus ist, bei gleichem Beginne der Schw. nicht eine gerade Linie, sondern eine Parabel, die bei einiger Verstimmung der einen Gabel durch die Achterfiguren d in eine andere Parabel übergeht; e, f und g stellen in gleicher Weise die Uebergänge der Verstimmungsfiguren für die Quinte, Quarte und Terz

Fig. 170.

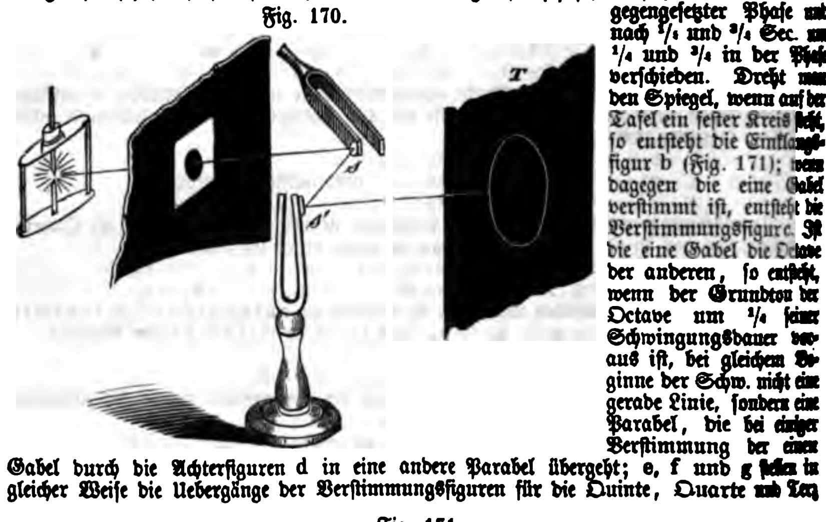
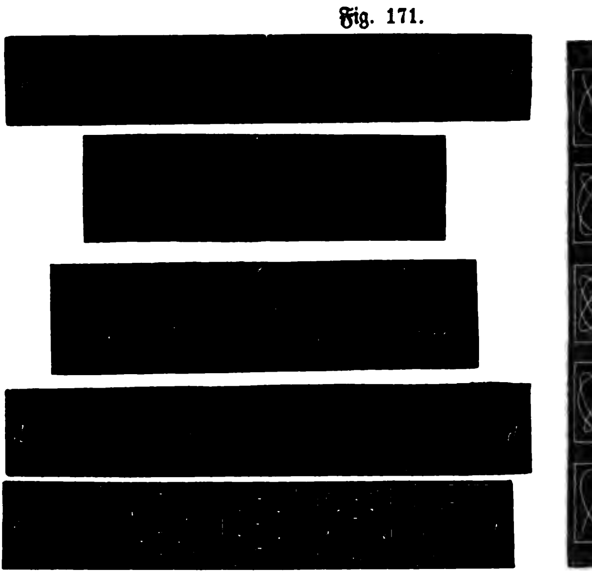
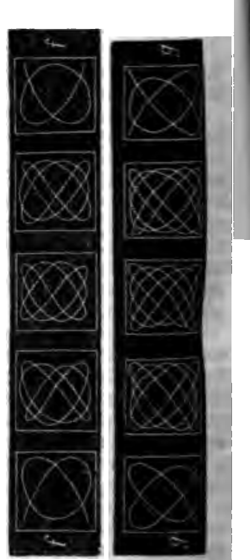


Fig. 171.





vor. Es ist leicht ersichtlich, daß mittels dieser Figuren ein Tauber Stimmgabeln zum Einklange oder zu jedem beliebigen Intervall mit solcher Reinheit stimmen kann, wie es dem feinsten Gehöre wohl nicht gelingen dürfte.

271 Aufg. 432. Wie viele Schwebungen per Sec. gibt das Intervall cd in den 4 mittleren Octaven? Aufl.: $d_{-1} - c_{-1} = 8$, $d - c = 16$, $d_1 - c_1 = 33$, $d_2 - c_2 = 65$. — A. 433. In der dreigestrichenen Octave ist $f_3 - e_3 = 77$; wo entsteht in dem Abstande $= 2$ Octaven dieselbe Zahl? Aufl.: $4x - x = 77$, daher $x = 26$; also $as_{-1} - as_{-3}$. — A. 434. Wo gibt ein Ton mit seiner kleinen Sec. gerade soviel Schweb. als mit einer Octave? Aufl.: Die Schwz. des ersten Tones sei x, der zweite sei y Octaven entfernt;

$^{16}/_{15}$ x — x = x . 2^{y+1} — x . 2^y, woraus c_{-2} — c_{-3} = cis_1 — c_1 = 16. — A. 435. : kleine Sec. gibt 10 Schweb.? Aufl.: $^{16}/_{15}$ x — x = 10, daher x = 150; dis — d. 436. Welche große Quarte gibt die größte Rauhigkeit von 33 Schweb.? Aufl.: $^4/_3$. x — x = 33; daher x = 78; a_{-1} — dis_{-1}. — A. 437. Wenn ein Ton mit a_{-1}-Gabel 11 Schweb. gibt, wie hoch ist er? Aufl.: 97,7 = g_{-1}. — A. 438. Eine Saite er Länge 1^m stimmt mit einer Gabel; eine andere von der Länge $1{,}01^m$ gibt 5 Schweb. erselben; welchen Ton gibt die Gabel? Aufl.: x : (x — 5) = 1,01 : 1; hieraus 05 = ca. c_2. — A. 439. Im Appunn'schen Tonmesser sind 32 Zungen, von denen olgende mit der vorhergehenden 4 Schweb. gibt; welches ist der tiefste Ton, wenn der die Octave desselben ist? Aufl.: x + 4 . 32 = 2x; daraus x = 128. — A. 440. iele Schweb. geben die Grundtöne und Obertöne von c_{-1} und d_{-1}? Aufl.: d_{-1} — = 8; d — c = 16; a — g = 22; d_1 — c_1 = 32; fis_1 — e_1 = 40; a_1 — g_1 = 44; u. s. w.

4. Die Stärke des Schalles.

Die Stärke der Schallempfindung hängt von vielen Umständen ab: 1. Von 272 Entstehungsstärke des Schalles; diese ist proportional dem Quadrat der Amde und dem Quadrat der mittleren Schwingungsgeschwindigkeit. 2. Von der affenheit des Mediums, in welchem der Schall entsteht, und in welchem der l sich fortpflanzt; je dichter und gleichartiger das Medium ist, desto stärker : Schall. 3. Von der Menge der Theilchen des Fortpflanzungsmediums, denen chall durch die Schallquelle mitgetheilt wird; je größer die Zahl der gleichbewegten Mediumtheilchen ist, desto stärker ist der Schall. 4. Von der Zahl ichtungen, in welchen der Schall ausgebreitet wird; je größer die Zahl ist, kleiner ist auf jeder einzelnen Richtung die Schallstärke. 5. Von der Entfernung hres von der Schallquelle; die Intensität des Schalles ist umgekehrt proportiom Quadrat der Entfernung von der Schallquelle. 6. Von der Empfindlichkeit hres; das Ohr ist um so empfindlicher, je weniger es durch andere Geräusche umpft ist; das Ohr ist empfindlicher für hohe Töne als für tiefe.

Es ist ein Mangel in der Akustik, daß keine Einheit der Schallintensität besteht und honometer zur Vergleichung, zur quantitativen Bestimmung der Schallintensitäten, e Optik ein analoges Mittel in dem Photometer besitzt. Durch das Helmholtz'sche nanpendel und die sensitiven Flammen sind nun wohl Mittel geboten, sehr schwache noch zu erkennen und nach ihrer Intensität abzuschätzen; allein ein genaues Maß dieselben nicht. Noch weniger kann das Ohr ohne Hilfsmittel das Verhältniß der : verschiedener Schalle bestimmen; es ist nur im Stande, zwei Schalle als verschieden n erkennen, wenn ihre Stärke nach Renz und Wolf um 28, nach Volkmann um 25% eden ist; und dieser Betrag der Verschiedenheit gilt in gleicher Weise für die schwächsten ich für die stärksten Schalle. Es ist dies ein specieller Fall von Fechners psychoischem Gesetze (1859), das am einfachsten und allgemein in folgender Weise ausgen werden kann: Die eben noch sicher empfundenen Zunahmen verschiedener Reizstärken ten sich wie die Reizstärken selbst, sie sind gleiche Bruchtheile derselben, beim Schalle $^1/_3$. Unter Leitung von Vierordt hat Nörr (1879) durch Fallversuche das Gesetz für ndungsstärken von 1,7 bis 500 000 beim Schalle nachgewiesen; Bosanquet gab (1878) nenen allgemeinen Beweis für das Gesetz. — Alfred Mayer (1873) hat einen Apparat t, durch welchen wenigstens die Intensitäten zweier Töne von gleicher Höhe nach Satz 5. hen werden können. In gleicher Entfernung von den 2 Tonquellen sind Resonatoren tellt, die auf den Ton abgestimmt sind, und von welchen 2 Röhren, deren Längenchied gleich der halben Wellenlänge des Tones ist, nach einer König'schen Flampsel gehen. Tönt nur eine Tonquelle, so entstehen in dem rotirenden Spiegel die ten Zacken; tönt auch die andere in gleicher Stärke, so heben sich die Schw. auf und scheint im Spiegel das glatte Feuerband. Sind aber die Töne nicht von gleicher e, so verschwinden die Zacken nicht; sie verschwinden erst dann, wenn die stärkere Tonso weit entfernt wird, daß durch die Entfernung ihre Intensität der der schwächeren geworden ist. Wenn eine und dieselbe Tonquelle n mal so weit entfernt wird, so klingt h dem 5. Satze n^2 mal so schwach; wenn daher eine andere Tonquelle in n facher Entg ebenso stark klingt, so muß sie n^2 mal so stark sein. Man entfernt demnach die eine uelle so weit, bis die Zacken verschwinden; dann verhalten sich die zwei Tonstärken wie uadrate der Entf. von dem Flammenzeiger. Weber schlug schon (1846) als Grundten eines Phonometers vor, die Schallschw. in elektrische Ströme zu verwandeln und

Gerade und diese durch die sich verbreiternde Ellipse wieder in den Kreis über u. s. w. (Fig. 171), weil eben die Verschiedenheit der Schwingungszeit die drei ersten genannten Fälle abwechselnd herbeiführt. Denn sind die 2 Gabeln um 1 Schw. in 1 Sec. verschieden und beginnen sie z. B. mit gleicher Phase, so sind sie nach 1 Sec. wieder in gleicher Phase, nach ½ Sec. aber in entgegengesetzter Phase und nach ¼ und ¾ Sec. um ¼ und ¾ in der Phase verschieden. Dreht man den Spiegel, wenn auf der Tafel ein fester Kreis steht, so entsteht die Einklangsfigur b (Fig. 171); wenn dagegen die eine Gabel verstimmt ist, entsteht die Verstimmungsfigur c. Ist die eine Gabel die Octave der anderen, so entsteht, wenn der Grundton der Octave um ¼ seiner Schwingungsdauer voraus ist, bei gleichem Beginne der Schw. nicht eine gerade Linie, sondern eine Parabel, die bei einiger Verstimmung der einen Gabel durch die Achterfiguren d in eine andere Parabel übergeht; e, f und g stellen in gleicher Weise die Uebergänge der Verstimmungsfiguren für die Quinte, Quarte und Terz vor.

Fig. 170.

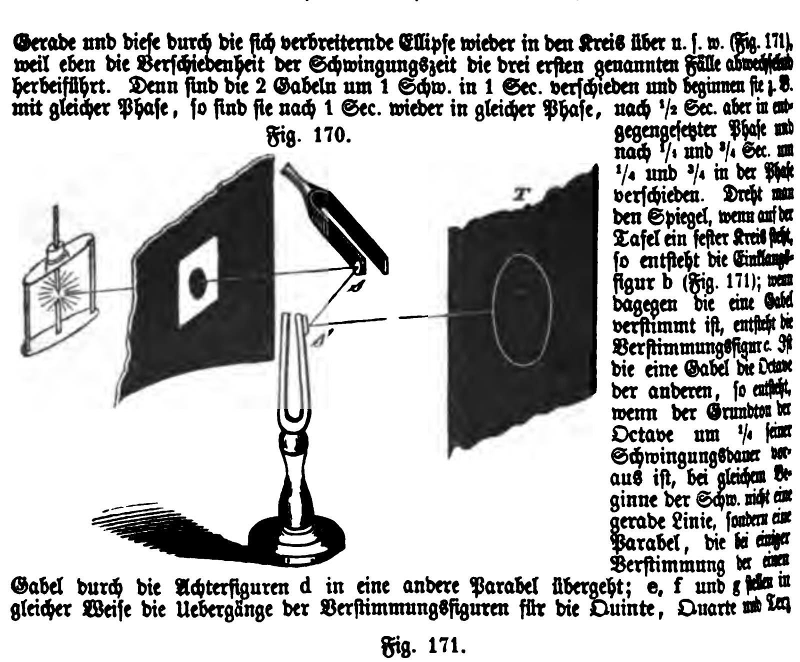
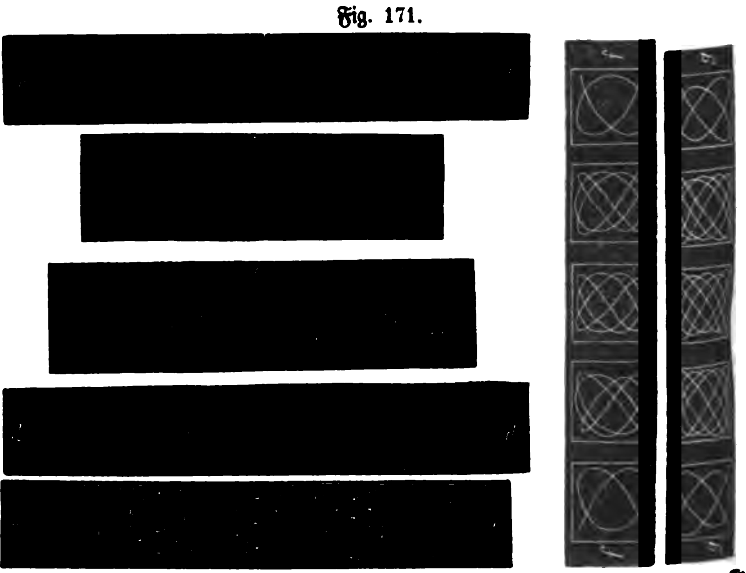


Fig. 171.



Es ist leicht ersichtlich, daß mittels dieser Figuren ein Tauber Stimmgabeln zum Einklange oder zu jedem beliebigen Intervall mit solcher Reinheit stimmen kann, wie es dem feinsten Gehöre wohl nicht gelingen dürfte.

271 Aufg. 432. Wie viele Schwebungen per Sec. gibt das Intervall cd in den 4 mittleren Octaven? Aufl.: $d_{-1} - c_{-1} = 8$, $d - c = 16$, $d_1 - c_1 = 33$, $d_2 - c_2 = 65$. — A. 433. In der dreigestrichenen Octave ist $f_3 - e_3 = 77$; wo entsteht in dem Abstande = 2 Octaven dieselbe Zahl? Aufl.: $4x - x = 77$, daher $x = 26$; also $as_{-1} - as_{-1}$. — A. 434. Wo gibt ein Ton mit seiner kleinen Sec. gerade soviel Schweb. als mit einer Octave? Aufl.: Die Schwz. des ersten Tones sei x, der zweite sei y Octaven entfernt;

daher $^{16}/_{15}\,x - x = x \,.\, 2^{y+1} - x \,.\, 2^y$, woraus $c_{-2} - c_{-3} = cis_1 - c_1 = 16$. — A. 435. Welche kleine Sec. gibt 10 Schweb.? Aufl.: $^{16}/_{15}\,x - x = 10$, daher $x = 150$; dis — d. — A. 436. Welche große Quarte gibt die größte Rauhigkeit von 33 Schweb.? Aufl.: $^{16}/_{15} \,.\, ^4/_3 \,.\, x - x = 33$; daher $x = 78$; a_{-1} — dis_{-1}. — A. 437. Wenn ein Ton mit einer a_{-1}-Gabel 11 Schweb. gibt, wie hoch ist er? Aufl.: $97{,}7 = g_{-1}$. — A. 438. Eine Saite von der Länge 1^m stimmt mit einer Gabel; eine andere von der Länge $1{,}01^m$ gibt 5 Schweb. mit derselben; welchen Ton gibt die Gabel? Aufl.: $x : (x - 5) = 1{,}01 : 1$; hieraus $x = 505 =$ ca. c_2. — A. 439. Im Appunn'schen Tonmesser sind 32 Zungen, von denen jede folgende mit der vorhergehenden 4 Schweb. gibt; welches ist der tiefste Ton, wenn der höchste die Octave desselben ist? Aufl.: $x + 4 \,.\, 32 = 2x$; daraus $x = 128$. — A. 440. Wie viele Schweb. geben die Grundtöne und Obertöne von c_{-1} und d_{-1}? Aufl.: $d_{-1} - c_{-1} = 8$; $d - c = 16$; $a - g = 22$; $d_1 - c_1 = 32$; $fis_1 - e_1 = 40$; $a_1 - g_1 = 44$; u. s. w.

4. Die Stärke des Schalles.

272 Die Stärke der Schallempfindung hängt von vielen Umständen ab: 1. Von der Entstehungsstärke des Schalles; diese ist proportional dem Quadrat der Amplitude und dem Quadrat der mittleren Schwingungsgeschwindigkeit. 2. Von der Beschaffenheit des Mediums, in welchem der Schall entsteht, und in welchem der Schall sich fortpflanzt; je dichter und gleichartiger das Medium ist, desto stärker ist der Schall. 3. Von der Menge der Theilchen des Fortpflanzungsmediums, denen der Schall durch die Schallquelle mitgetheilt wird; je größer die Zahl der gleichzeitig bewegten Mediumtheilchen ist, desto stärker ist der Schall. 4. Von der Zahl der Richtungen, in welchen der Schall ausgebreitet wird; je größer die Zahl ist, desto kleiner ist auf jeder einzelnen Richtung die Schallstärke. 5. Von der Entfernung des Ohres von der Schallquelle; die Intensität des Schalles ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle. 6. Von der Empfindlichkeit des Ohres; das Ohr ist um so empfindlicher, je weniger es durch andere Geräusche abgestumpft ist; das Ohr ist empfindlicher für hohe Töne als für tiefe.

Es ist ein Mangel in der Akustik, daß keine Einheit der Schallintensität besteht und kein Phonometer zur Vergleichung, zur quantitativen Bestimmung der Schallintensitäten, wie die Optik ein analoges Mittel in dem Photometer besitzt. Durch das Helmholtz'sche Membranpendel und die sensitiven Flammen sind nun wohl Mittel geboten, sehr schwache Töne noch zu erkennen und nach ihrer Intensität abzuschätzen; allein ein genaues Maß bieten dieselben nicht. Noch weniger kann das Ohr ohne Hilfsmittel das Verhältniß der Stärke verschiedener Schalle bestimmen; es ist nur im Stande, zwei Schalle als verschieden stark zu erkennen, wenn ihre Stärke nach Renz und Wolf um 28, nach Volkmann um 25% verschieden ist; und dieser Betrag der Verschiedenheit gilt in gleicher Weise für die schwächsten wie auch für die stärksten Schalle. Es ist dies ein specieller Fall von Fechners psychophysischem Gesetze (1859), das am einfachsten und allgemein in folgender Weise ausgesprochen werden kann: Die eben noch sicher empfundenen Zunahmen verschiedener Reizstärken verhalten sich wie die Reizstärken selbst, sie sind gleiche Bruchtheile derselben, beim Schalle etwa $^1/_4$. Unter Leitung von Vierordt hat Nörr (1879) durch Fallversuche das Gesetz für Empfindungsstärken von 1,7 bis 500 000 beim Schalle nachgewiesen; Bosanquet gab (1878) einen neuen allgemeinen Beweis für das Gesetz. — Alfred Mayer (1873) hat einen Apparat erdacht, durch welchen wenigstens die Intensitäten zweier Töne von gleicher Höhe nach Satz 5. verglichen werden können. In gleicher Entfernung von den 2 Tonquellen sind Resonatoren aufgestellt, die auf den Ton abgestimmt sind, und von welchen 2 Röhren, deren Längenunterschied gleich der halben Wellenlänge des Tones ist, nach einer König'schen Flammenkapsel gehen. Tönt nur eine Tonquelle, so entstehen in dem rotirenden Spiegel die bekannten Zacken; tönt auch die andere in gleicher Stärke, so heben sich die Schw. auf und es erscheint im Spiegel das glatte Feuerband. Sind aber die Töne nicht von gleicher Stärke, so verschwinden die Zacken nicht; sie verschwinden erst dann, wenn die stärkere Tonquelle so weit entfernt wird, daß durch die Entfernung ihre Intensität der der schwächeren gleich geworden ist. Wenn eine und dieselbe Tonquelle n mal so weit entfernt wird, so klingt sie nach dem 5. Satze n^2 mal so schwach; wenn daher eine andere Tonquelle in n facher Entfernung ebenso stark klingt, so muß sie n^2 mal so stark sein. Man entfernt demnach die eine Tonquelle so weit, bis die Zacken verschwinden; dann verhalten sich die zwei Tonstärken wie die Quadrate der Entf. von dem Flammenzeiger. Weber schlug schon (1846) als Grundgedanken eines Phonometers vor, die Schallschw. in elektrische Ströme zu verwandeln und

Maße; um z. B. die Tragweite einer Trompetensirene von 5 auf 7 Seemeilen zu steigern, muß die Arbeit der Tonerzeugung von 13 auf 400° zunehmen. Auch die Tonhöhe hat einen, jedoch geringen Einfluß; hohe Töne haben bei gleicher Arbeit eine geringere Tragweite und bei schwächeren Tönen ist die Abnahme besonders groß. Den größten Einfluß hat der Wind; mit dem Wind (unter 10^m Geschw.) ist die Tragweite 3 mal so groß als gegen denselben; bei stärkerem Wind nimmt die Tragweite in der Richtung desselben wieder ab. In irgend einer Richtung, die mit der Windrichtung den Winkel α bildet, ist die Tragweite $= 1/(1 - 0{,}5 \cos\alpha)$, wenn sie in der zum Wind senkrechten Richtung $= 1$ gesetzt wird. Weitere Einflüsse des Windes in 276. — Die starken Abweichungen von den Gesetzen der leb. Kft. und des Quadrates der Entf., welche Vierordt wahrnahm, werden sich wohl dadurch erklären, daß das Ohr die Schallstärke nicht genau unterscheidet; wenigstens fand Rayleigh (1882) ein ungeheures Mißverhältniß zwischen zwei Tönen, die dem Ohr von gleicher Stärke erscheinen, wenn man die Stärke der Luftschwingungen dieser Töne mit einem feinen Instrument mißt, dessen Hauptelement ein leichter Spiegel ist, der zusammen mit einem Magnet an einem Seidenfaden hängt und durch die Luftbewegung gedreht wird. — 6. Wie man bei Tage die Sterne nicht sieht, so verschwinden nach Fechners Gesetz für das durch Tagesgeräusch abgestumpfte Ohr die leiseren Töne, die man in der ruhigen Nacht deutlich hört; auch schärft das Ruhen anderer Sinne das Gehör; mit geschlossenen Augen oder nach Verlust des Augenlichtes hört man besser. Auch ist das Ohr für hohe Töne empfindlicher als für tiefe; als Helmholtz durch gleich starkes Anblasen der Sirene hohe und tiefe Töne erzeugte, klangen die ersteren viel stärker. Unangenehme Geräusche, wie Kritzen, Klirren, Zischen u. s. w. sind wahrscheinlich mit sehr hohen unharmonischen Tönen vermischt.

Die Tragweite des Schalles ist die Entfernung von der Schallquelle, in welcher derselbe eben noch deutlich gehört wird. Nach Allard findet man dieselbe (x) aus der Fl. $T \cdot 0{,}473^x = 0{,}000\,0277\, nx^2$, worin n die Schwz. des Tones und T die zu seiner Erzeugung nöthige Arbeit in mk bedeutet.

5. Die Fortpflanzung des Schalles.

273 Der Schall pflanzt sich meist durch longitudinale Wellen fort, nur in seltenen Fällen durch transversale Wellen (236.); daher gelten die Sätze über die Ausbreitung der Wellen auch für die Fortpflanzung des Schalles: 1. Der Schall pflanzt sich von seiner Quelle nach allen Richtungen fort, die man Schallstrahlen nennt. 2. Die Schallstrahlen sind in einem isotropen Medium gerade Linien, werden aber bei Uebergängen in andere Medien von ihrer Richtung abgelenkt. 3. Hohe und tiefe Töne, starke und schwache Klänge pflanzen sich (225.) mit gleicher Geschwindigkeit fort.

Nachweis. Daß der Schall sich nach allen Richtungen fortpflanzt, ist einfach dadurch nachgewiesen, daß man einen Ton rings um die Tonquelle hört. Die gerade Richtung der Schallstrahlen zeigt uns die Schwächung des Schalles durch einen in die gerade Linie zwischen Ohr und Schallquelle gebrachten Schirm; doch ist der Schallschatten viel schwächer als der Lichtschatten, weil die Schallbewegung viel langsamer ist und sich auch langsamer fortpflanzt als die Lichtbewegung, und weil daher nach dem Huyghens'schen Princip (230.) die seitliche Fortpflanzung der Wellenbewegungen stärker stattfinden kann. — Die gleiche Geschw. starker und schwacher, hoher und tiefer Töne zeigt uns das Anhören jedes vielstimmigen Musikstückes. Biot ließ an dem einen Ende der 1000^m langen Röhre solche Stücke spielen und hörte sie am anderen Ende in der richtigen Harmonie. Untersuchungen von Regnault und Kundt (1868) zeigten indeß, daß der Satz 3. nicht ganz ohne Einschränkung besteht; Regnault fand nämlich, daß sehr starke Töne sich etwas rascher als schwache fortpflanzen, wie auch schon Parry entfernte Kanonenschüsse eher als das zugehörige Commandowort gehört hatte; doch beziehen sich die Versuche Regnaults auf Röhren und nicht auf die freie Luft. Die Geschw. der Explosionswellen von Flintenschüssen, Zündhütchenknallen und elektr. Funken in Kanälen wurden (1877 u. 78) von Mach und Genossen mittels der Figuren untersucht, welche die Explosionen nach Antolik auf berußten Flächen erzeugen; es ergab sich, daß die Geschw. der Fortpflanzung solcher Explosionen die des Schalles bedeutend übersteigt, und dies um so mehr, je stärker die Explosion ist, und zwar anfänglich am meisten, während sie bei weiterer Ausbreitung sich bald der des Schalles nähert. Bei genauer Messung ergab sich, daß die Geschw. in der nächsten Strecke von 80^{mm} den hohen Betrag 756^m erreichte, aber schon in einer Entf. von 907^{mm} auf 373^m gesunken war. Auch Jaques (1879) fand, daß die Geschw. eines Kanonenknalles in der Richtung des Rohres größer, in entgegengesetzter Richtung anfänglich viel kleiner, dann größer und endlich gleich der gewöhnlichen

Geschw. des Schalles in der Luft ist. So soll nach Earnshaw auch die Geschw. des Donners größer sein als die gewöhnlicher Schalle. Während also ein heftiger Stoß die Geschw. des Schalles vergrößert, pflanzt sich ein weniger starker Stoß langsamer durch die Luft fort als der Schall. Dies zeigt der Luftstoßapparat, ein weites kurzes mit Rauch erfülltes Rohr, das am einen Ende mit einer Membran verschlossen ist und am andern eine kreisförmige Oeffnung hat; in einigen Schritten Entf. steht in der Achsenrichtung eine Kerzenflamme; schlägt man gegen die Membran, so dringt ein Rauchring aus der Oeffnung; wo dieser die Flamme trifft, verlöscht sie durch den Luftstoß. Stellt man an ihre Stelle eine sensitive Flamme, so zuckt dieselbe durch den Schall des Schlages viel eher, als sie von dem Rauchringe getroffen und durch den Luftstoß völlig zersplittert wird. Angesichts dieses Unterschiedes scheint es gewagt, daß neuerdings durch Fortpflanzung von Membranimpulsen die Schallgeschw. aufgesucht wird. — Auch die Tonhöhe soll einen Unterschied der Geschw. bedingen; Kundts Versuche ergaben, daß tiefe Töne sich in Röhren langsamer fortpflanzen als hohe, und daß der Unterschied um so größer ist, je enger die Röhren sind. Regnault hatte dagegen durch eine lange Röhre die Obertöne eines Klanges später als die Grundtöne gehört; dies scheint sich indeß dadurch zu erklären, daß dieselben viel schwächer als der Grundton sind und sich deßhalb langsamer fortpflanzen. Denn auch Seebecks (1871) Versuche ergaben, daß hohe Töne sich in Röhren schneller fortpflanzen als tiefe; außerdem fand Seebeck, daß in Röhren überhaupt die Geschw. um einige Meter kleiner wird, und daß der Verlust dem Durchmesser umgekehrt proportional und von der Beschaffenheit der inneren Oberfläche abhängig ist. Neue Versuche hierüber liegen von Kayser (1878) vor, die ebenfalls das Resultat ergaben, daß die Schallgeschw. in Röhren kleiner ist als in der Luft, und daß die Verzögerung umgekehrt proportional ist dem Röhrendurchmesser und der Schwingungszahl! Weinholds Versuche (1872) scheinen die Folgerung zu erlauben, daß in Drähten ein Unterschied für hohe und tiefe, starke und schwache Töne nicht bemerkbar ist, daß also diese dem Gesetze 3. genauer folgen; denn an dem einen Ende eines 600m langen Eisendrahtes, der an beiden Enden mit Resonanzkästchen versehen war, konnte ein am anderen Ende gespieltes Musikstück oder ein hier mit gewöhnlicher Stimme geführtes Gespräch so klar und deutlich gehört werden, als ob man an diesem Ende gewesen wäre.

Die Geschwindigkeit des Schalles. Für alle Wellenbewegungen gilt die Fl. (29), nach welcher $c = \sqrt{(e : d)}$, ein Werth, der für die Fortpflanzung des Schalles in der Luft in 250. und 251. die Fl. (37) u. (39) annahm $c = \sqrt{(1{,}42\, h s' g : s)}$. Hierin bedeutet s das spec. G. der Luft = 0,001293 für 0° C. Da die Wärme die Körper ausdehnt, die Luft für jeden Grad um $\alpha = 0{,}003665$, so wird bei höherer Temperatur die Dichte s geringer und zwar in dem Maße, als das Volumen v größer wird. Hat aber ein Körper für 0° das Vol. v, so nimmt dasselbe für t^0 um $v\alpha t$ zu, wird also $v + v\alpha t$ oder $v(1 + \alpha t)$; es ist $1 + \alpha t$ mal so groß geworden; ebenso vielfach wird die Dichte kleiner, wird also $s : (1 + \alpha t)$. Setzen wir in die Gleichung für c diesen Werth statt s ein, so entsteht: 274

$$c = \sqrt{[(1{,}42\, h s' g : s)(1 + \alpha t)]} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (40)$$

Werden hierin die bekannten Zahlenwerthe eingeführt, so ergibt sich für 0° C die Geschwindigkeit des Schalles $c = 333^m$,
wozu für jeden Centigrad etwa $\frac{1}{2}^m$ zu addiren ist. Außerdem sagt uns Fl. (29), daß die Geschwindigkeit unabhängig von dem Luftdrucke ist, da nach Mariottes Gesetz die Elasticität und die Dichtigkeit in gleichem Maße zu- oder abnehmen.

Durch zahlreiche und höchst genaue Versuche wurden diese Resultate bewährt gefunden. Die Mitglieder der Akademie zu Paris (1738), dann Arago, Mathieu, Prony, Humboldt, Gay-Lussac und Bouvard (1822), die holländischen Physiker Moll, van Beek und Kuytenbrower (1822) ließen an zwei gegenseitig sichtbaren Orten, deren Entf. genau gemessen war, Kanonen lösen und beobachteten genau die Zeit, welche zwischen der Wahrnehmung des Lichtblitzes und des Kanonendonners lag; mit der Zahl der Sec. wurde die Entf. dividirt, und so erhielten die ersten $c = 337^m$, die zweite Beobachtungsgruppe $331{,}2^m$, die letzte Gruppe $332{,}26^m$. Durch die Beobachtungen von Bravais und Martens 1844 zwischen dem Faulhorn und dem Brienzer See wurde auch die Unabhängigkeit vom Luftdrucke festgestellt.

Eine weitere Bestätigung ergibt eine andere Methode, die es auch erlaubt, die Geschw. des Schalles in anderen Gasen zu beobachten. Da die Wellenlänge λ der Weg ist, um den sich die Schallbewegung in der Schwingungszeit, in $\frac{1}{n}$ Sec., fortpflanzt, so ist der Weg in 1 Sec. oder die Geschw. $c = n\lambda$; da nun die Länge l einer offenen Pfeife gleich der halben Wellenlänge und für gedeckte Pfeifen $= \frac{1}{4}$ derselben ist, so ergibt sich für offene Pfeifen $c = 2ln$ und für gedeckte $c = 4ln$. Kennt man also die Schwz. eines Tones und

Maße; um z. B. die Tragweite einer Trompetensirene von 5 auf 7 Seemeilen zu steigern, muß die Arbeit der Tonerzeugung von 13 auf 400° zunehmen. Auch die Tonhöhe hat einen, jedoch geringen Einfluß; hohe Töne haben bei gleicher Arbeit eine geringere Tragweite und bei schwächeren Tönen ist die Abnahme besonders groß. Den größten Einfluß hat der Wind; mit dem Wind (unter 10^{m} Geschw.) ist die Tragweite 3 mal so groß als gegen denselben; bei stärkerem Wind nimmt die Tragweite in der Richtung desselben wieder ab. In irgend einer Richtung, die mit der Windrichtung den Winkel α bildet, ist die Tragweite $= 1/(1-0{,}5\cos\alpha)$, wenn sie in der zum Wind senkrechten Richtung $= 1$ gesetzt wird. Weitere Einflüsse des Windes in 276. — Die starken Abweichungen von den Gesetzen der leb. Kft. und des Quadrates der Entf., welche Vierordt wahrnahm, werden sich wohl dadurch erklären, daß das Ohr die Schallstärke nicht genau unterscheidet; wenigstens fand Rayleigh (1882) ein ungeheures Mißverhältniß zwischen zwei Tönen, die dem Ohr von gleicher Stärke erscheinen, wenn man die Stärke der Luftschwingungen dieser Töne mit einem feinen Instrument mißt, dessen Hauptelement ein leichter Spiegel ist, der zusammen mit einem Magnet an einem Seidenfaden hängt und durch die Luftbewegung gedreht wird. — 6. Wie man bei Tage die Sterne nicht sieht, so verschwinden nach Fechners Gesetz für das durch Tagesgeräusch abgestumpfte Ohr die leiseren Töne, die man in der ruhigen Nacht deutlich hört; auch schärft das Ruhen anderer Sinne das Gehör; mit geschlossenen Augen oder nach Verlust des Augenlichtes hört man besser. Auch ist das Ohr für hohe Töne empfindlicher als für tiefe; als Helmholtz durch gleich starkes Anblasen der Sirene hohe und tiefe Töne erzeugte, klangen die ersteren viel stärker. Unangenehme Geräusche, wie Kritzen, Klirren, Zischen u. s. w. sind wahrscheinlich mit sehr hohen unharmonischen Tönen vermischt.

Die Tragweite des Schalles ist die Entfernung von der Schallquelle, in welcher derselbe eben noch deutlich gehört wird. Nach Allard findet man dieselbe (x) aus der Fl. $T \cdot 0{,}473^{x} = 0{,}000\,0277\, n x^{2}$, worin n die Schwz. des Tones und T die zu seiner Erzeugung nöthige Arbeit in mk bedeutet.

5. Die Fortpflanzung des Schalles.

273 Der Schall pflanzt sich meist durch longitudinale Wellen fort, nur in seltenen Fällen durch transversale Wellen (236.); daher gelten die Sätze über die Ausbreitung der Wellen auch für die Fortpflanzung des Schalles: 1. Der Schall pflanzt sich von seiner Quelle nach allen Richtungen fort, die man Schallstrahlen nennt. 2. Die Schallstrahlen sind in einem isotropen Medium gerade Linien, werden aber bei Uebergängen in andere Medien von ihrer Richtung abgelenkt. 3. Hohe und tiefe Töne, starke und schwache Klänge pflanzen sich (225.) mit gleicher Geschwindigkeit fort.

Nachweis. Daß der Schall sich nach allen Richtungen fortpflanzt, ist einfach dadurch nachgewiesen, daß man einen Ton rings um die Tonquelle hört. Die gerade Richtung der Schallstrahlen zeigt uns die Schwächung des Schalles durch einen in die gerade Linie zwischen Ohr und Schallquelle gebrachten Schirm; doch ist der Schallschatten viel schwächer als der Lichtschatten, weil die Schallbewegung viel langsamer ist und sich auch langsamer fortpflanzt als die Lichtbewegung, und weil daher nach dem Huyghens'schen Princip (230.) die seitliche Fortpflanzung der Wellenbewegungen stärker stattfinden kann. — Die gleiche Geschw. starker und schwacher, hoher und tiefer Töne zeigt uns das Anhören jedes vielstimmigen Musikstückes. Biot ließ an dem einen Ende der 1000^{m} langen Röhre solche Stücke spielen und hörte sie am anderen Ende in der richtigen Harmonie. Untersuchungen von Regnault und Kundt (1868) zeigten indeß, daß der Satz 3. nicht ganz ohne Einschränkung besteht; Regnault fand nämlich, daß sehr starke Töne sich etwas rascher als schwache fortpflanzen, wie auch schon Parry entfernte Kanonenschüsse eher als das zugehörige Commandowort gehört hatte; doch beziehen sich die Versuche Regnaults auf Röhren und nicht auf die freie Luft. Die Geschw. der Explosionswellen von Flintenschüssen, Zündhütchenknallen und elektr. Funken in Kanälen wurden (1877 u. 78) von Mach und Genossen mittels der Figuren untersucht, welche die Explosionen nach Antolik auf berußten Flächen erzeugen; es ergab sich, daß die Geschw. der Fortpflanzung solcher Explosionen die des Schalles bedeutend übersteigt, und dies um so mehr, je stärker die Explosion ist, und zwar anfänglich am meisten, während sie bei weiterer Ausbreitung sich bald der des Schalles nähert. Bei genauer Messung ergab sich, daß die Geschw. in der nächsten Strecke von 80^{mm} den hohen Betrag 756^{m} erreichte, aber schon in einer Entf. von 907^{mm} auf 373^{m} gesunken war. Auch Jaques (1879) fand, daß die Geschw. eines Kanonenknalles in der Richtung des Rohres größer, in entgegengesetzter Richtung anfänglich viel kleiner, dann größer und endlich gleich der gewöhnlichen

Geschw. des Schalles in der Luft ist. So soll nach Earnshaw auch die Geschw. des Donners größer sein als die gewöhnlicher Schalle. Während also ein heftiger Stoß die Geschw. des Schalles vergrößert, pflanzt sich ein weniger starker Stoß langsamer durch die Luft fort als der Schall. Dies zeigt der Luftstoßapparat, ein weites kurzes mit Rauch erfülltes Rohr, das am einen Ende mit einer Membran verschlossen ist und am andern eine kreisförmige Oeffnung hat; in einigen Schritten Entf. steht in der Achsenrichtung eine Kerzenflamme; schlägt man gegen die Membran, so dringt ein Rauchring aus der Oeffnung; wie dieser die Flamme trifft, verlöscht sie durch den Luftstoß. Stellt man an ihre Stelle eine sensitive Flamme, so zuckt dieselbe durch den Schall des Schlages viel eher, als sie von dem Rauchringe getroffen und durch den Luftstoß völlig zersplittert wird. Angesichts dieses Unterschiedes scheint es gewagt, daß neuerdings durch Fortpflanzung von Membranimpulsen die Schallgeschw. aufgesucht wird. — Auch die Tonhöhe soll einen Unterschied der Geschw. bedingen; Kundts Versuche ergaben, daß tiefe Töne sich in Röhren langsamer fortpflanzen als hohe, und daß der Unterschied um so größer ist, je enger die Röhren sind. Regnault hatte dagegen durch eine lange Röhre die Obertöne eines Klanges später als die Grundtöne gehört; dies scheint sich indeß dadurch zu erklären, daß dieselben viel schwächer als der Grundton sind und sich deßhalb langsamer fortpflanzen. Denn auch Seebecks (1871) Versuche ergaben, daß hohe Töne sich in Röhren schneller fortpflanzen als tiefe; außerdem fand Seebeck, daß in Röhren überhaupt die Geschw. um einige Meter kleiner wird, und daß der Verlust dem Durchmesser umgekehrt proportional und von der Beschaffenheit der inneren Oberfläche abhängig ist. Neue Versuche hierüber liegen von Kayser (1878) vor, die ebenfalls das Resultat ergaben, daß die Schallgeschw. in Röhren kleiner ist als in der Luft, und daß die Verzögerung umgekehrt proportional ist dem Röhrendurchmesser und der Schwingungszahl. Weinholds Versuche (1872) scheinen die Folgerung zu erlauben, daß in Drähten ein Unterschied für hohe und tiefe, starke und schwache Töne nicht bemerkbar ist, daß also diese dem Gesetze 3. genauer folgen; denn an dem einen Ende eines 600^m langen Eisendrahtes, der an beiden Enden mit Resonanzkästchen versehen war, konnte ein am anderen Ende gespieltes Musikstück oder ein hier mit gewöhnlicher Stimme geführtes Gespräch so klar und deutlich gehört werden, als ob man an diesem Ende gewesen wäre.

274 **Die Geschwindigkeit des Schalles.** Für alle Wellenbewegungen gilt die Fl. (29), nach welcher $c = \sqrt{(e/d)}$, ein Werth, der für die Fortpflanzung des Schalles in der Luft in 250. und 251. die Fl. (37) u. (39) annahm $c = \sqrt{(1{,}42\ hs'g/s)}$. Hierin bedeutet s das spec. G. der Luft $= 0{,}001293$ für 0^0 C. Da die Wärme die Körper ausdehnt, die Luft für jeden Grad um $\alpha = 0{,}003665$, so wird bei höherer Temperatur die Dichte s geringer und zwar in dem Maße, als das Volumen v größer wird. Hat aber ein Körper für 0^0 das Vol. v, so nimmt dasselbe für t^0 um $v\alpha t$ zu, wird also $v + v\alpha t$ oder $v\,(1 + \alpha t)$; es ist $1 + \alpha t$ mal so groß geworden; ebenso vielfach wird die Dichte kleiner, wird also $s/(1 + \alpha t)$. Setzen wir in die Gleichung für c diesen Werth statt s ein, so entsteht

$$c = \sqrt{[(1{,}42\ hs'g/s)(1 + \alpha t)]} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (40)$$

Werden hierin die bekannten Zahlenwerthe eingeführt, so ergibt sich für 0^0 C die Geschwindigkeit des Schalles $c = 333^m$,
wozu für jeden Centigrad etwa $^1/_2{}^m$ zu addiren ist. Außerdem sagt uns Fl. (29), daß die Geschwindigkeit unabhängig von dem Luftdrucke ist, da nach Mariottes Gesetz die Elasticität und die Dichtigkeit in gleichem Maße zu- oder abnehmen.

Durch zahlreiche und höchst genaue Versuche wurden diese Resultate bewährt gefunden. Die Mitglieder der Akademie zu Paris (1738), dann Arago, Mathieu, Prony, Humboldt, Gay-Lussac und Bouvard (1822), die holländischen Physiker Moll, van Beck und Kuytenrower (1822) ließen an zwei gegenseitig sichtbaren Orten, deren Entf. genau gemessen war, Kanonen lösen und beobachteten genau die Zeit, welche zwischen der Wahrnehmung des Lichtblitzes und des Kanonendonners lag; mit der Zahl der Sec. wurde die Entf. dividirt, und so erhielten die ersten $c = 337^m$, die zweite Beobachtungsgruppe $331{,}2^m$, die letzte Gruppe $332{,}26^m$. Durch die Beobachtungen von Bravais und Martens 1844 zwischen dem Faulhorn und dem Brienzer See wurde auch die Unabhängigkeit vom Luftdrucke festgestellt.

Eine weitere Bestätigung ergibt eine andere Methode, die es auch erlaubt, die Geschw. des Schalles in anderen Gasen zu beobachten. Da die Wellenlänge λ der Weg ist, um den sich die Schallbewegung in der Schwingungszeit, in $^1/_n$ Sec., fortpflanzt, so ist der Weg in 1 Sec. oder die Geschw. $c = n\lambda$; da nun die Länge l einer offenen Pfeife gleich der halben Wellenlänge und für gedeckte Pfeifen $= {}^1/_4$ derselben ist, so ergibt sich für offene Pfeifen $c = 2ln$ und für gedeckte $c = 4ln$. Kennt man also die Schwz. eines Tones und

die Länge der Pfeife, die diesen Ton erzeugt, so kann man c berechnen. Wertheim fand hierdurch im Mittel c = 331,7 und fand außerdem den Einfluß der Temperatur bestätigt. — Da nach Fl. $c = \sqrt{(e/d)}$ bei verschiedenen Gasen, die unter gleichem Drucke stehen, also gleiche Elasticität e besitzen, die Geschw. in umgekehrtem Verhältnisse mit der Dichte d steht, so läßt sich die Geschw. des Schalles in anderen Gasen berechnen; so ist für Wasserstoff $c = 333 / \sqrt{0,0688} = 1280^m$. Ganz genau kann dieser Werth nicht sein, weil die Zahl k = 1,42 (s. 250.), bei verschiedenen Gasen einen etwas verschiedenen Werth hat. Wirklich erhält man auch, wenn Pfeifen mit verschiedenen Gasen angeblasen werden, wie es Chladni, Dulong und Wertheim gethan haben, und wenn man die Schwz. des Tones mit der doppelten Länge der offenen Pfeife multiplicirt, etwas andere Werthe, als sie die obige Berechnung ergibt; die theoretischen Werthe kommen aber den beobachteten nahe, wenn man statt 1,42 die für das betreffende Gas aus der Wärmelehre erhaltenen Werthe substituirt; so erhielt Dulong für H 1269^m. Umgekehrt läßt sich aus dem Unterschiede der theoretischen und der beobachteten Geschw. c das k für Gase bestimmen; so fand Karl Strecker (1881) für Cl-, Br- und J-Gas c = 205, 135 u. 108^m und hiermit k = 1,323, 1,293 und 1,307; später (1882) fand er für die Verbindungen dieser Stoffe miteinander k = 1,3 und mit Wasserstoff k = 1,4.

Unter den neueren Methoden zur Bestimmung der Schallgeschw. ist die von Kundt (1866) hervorzuheben, deren Grundidee schon erwähnt wurde. Die Abstände der durch die Staubfiguren erkennbaren Knoten geben die Länge der stehenden Luftwellen, die bekanntlich gleich der halben Länge der fortschreitenden Wellen ist, woraus nach der Fl. $c = n\lambda$ die Geschw. berechnet werden kann. Hiernach fand Kundt, wenn die Geschw. in der Luft $= 332,8^m$ ist, die im Wasserstoff 1284^m, im Kohlendioxyd 266^m, im Leuchtgas 533^m. Außerdem ergab sich die Geschw. bei 100° um 56^m größer als bei 0°; sie zeigte sich in weiten Röhren unabhängig vom Drucke der Luft, in engen aber mit dem Drucke zunehmend, während sie bei gleichbleibendem Drucke in engeren Röhren kleiner ist als in weiteren. Die Einflüsse der Röhrenwand beruhen nach Kundt auf Reibung und Wärmeaustausch der Luft mit den Röhrenwänden. — Wenn Kundt die Wellen durch einen geriebenen Stab, der an bestimmten Stellen eingeklemmt wurde, erregte, so konnte er durch Vergleichung der Tonwellenlänge des Stabes mit den Staubwellen auffinden, wie sich die Schallgeschw. in dem Stabe zu der in der Luft verhält; für Messing ergab sich dieselbe 10,87, für Kupfer 11,2, für Glas 15,2, für Stahl 15,3 mal so groß als für die Luft. Uebrigens war die Schallgeschw. in stabförmigen festen Körpern schon früher, von Chladni (1800), von Biot (1829), von Wertheim (1851) bestimmt worden. Chladni benutzte die Formeln $c = 2ln$ für offene Pfeifen und $c' = 2ln'$ für einen gleich langen beiderseits freien oder festen Stab. Aus diesen zwei Gl. folgt $c' = (n' : n)\,c$; man hat also einfach das Verhältniß der Schwgn. eines longitudinal tönenden Stabes und einer gleich langen offenen Pfeife mit der Geschw. in der Luft zu multipliciren, um die Geschw. in dem Stabe zu finden. Chladni und Wertheim fanden so, daß die Schallgeschw. in Blei 4, in Gold 6, in Zinn 7½, in Silber 8–9, in Kupfer 11—12, in Eisen 15—17, in Glas 17, in Holz 11—17 mal so groß ist als in der Luft. Man erhält ziemlich dieselben Zahlen, wenn man die Geschw. nach Fl. $c = \sqrt{(e/d)}$ oder $c = \sqrt{(eg/s)}$ berechnet; d, die Masse der Cubikeinheit, ist gleich dem spec. G. s, dem Gewichte der Cubikeinheit, dividirt durch die Acceleration g. Die angeführten Werthe gelten nur für stabförmige Körper; für ausgedehnte Massen fester Körper muß nach Wertheim die Formel $c = \sqrt{(\frac{3}{2} eg/s)}$ benutzt werden, weil bei jeder Verlängerung oder Verkürzung nach vielfachen Versuchen eine Volumenveränderung eintritt, die einen Theil der Elasticität verzehrt; die Volumenänderung beträgt ⅓ der Verlängerung, verzehrt also auch ⅓ der Elasticität, so daß dieselbe in ausgedehnter Masse nicht e, sondern $\frac{3}{2}$e beträgt. Versuche hierüber sind noch nicht angestellt. Ihlseng hat (1879) die Geschw. in Holzstäben bestimmt, indem er sie in tönendem Zustande gleichzeitig mit einer tönenden Stimmgabel nach der vibrographischen Methode ihre Schw. auf eine berußte Glastafel aufzeichnen ließ; so fand er für Cedernholz 4000, für Tannenholz 4700, für Nußholz 4800^m u. a. — Für weiche Körper hat Stefan (1866) nach Chladnis Methode die Schallgeschw. bestimmt, indem er Stäbe von solchen Stoffen als Verlängerungen von Glasstäben anbrachte und sie durch Reibung der Glasstäbe in Schw. versetzte; für Wachs ergab sich bei 20° die Geschw. $= 730^m$ und für jeden Grad mehr um 40^m abnehmend, für Unschlitt 360^m, für Kautschuk $30-60^m$. — Die Geschw. in Flüssigkeiten läßt sich ebenfalls nach Fl. (29) $c = \sqrt{(e/d)}$ berechnen; auch hierin ist $d = s/g$; die Elasticität e ist aus der Zusammendrückbarkeit des Wassers, = 50 Milliontel durch 1^{at} zu berechnen. Wenn hierfür $1^{at} = hs'$, wo h der Barometerstand und s' das spec. G. des Quecksilbers, erforderlich ist, so ist für die Compression auf die halbe Länge die Kraft $e = hs' / 0,000\,050$ (nach 65.) nöthig. Hieraus ergibt sich die Schallgeschw. im Wasser $c = \sqrt{(hs'g / 0,000\,05\,s)} = 1425^m$. Versuche von Colladon und Sturm (1817) am Genfer See haben diese Zahl als richtig erwiesen. Dagegen fand Wertheim durch Versuche mit Pfeifen nur 1173^m. O. E. Meyer (1874) ließ durch eine 3000^m lange, mit Wasser

gefüllte Bleiröhre einen Stoßimpuls geben, und fand entsprechend der Wertheim'schen Angabe, daß derselbe 3 Sec. Zeit brauche. Die Erklärung Wertheims für den verzögernden Einfluß der Stabform wurde in 249. angegeben: durch die bei einer Längencontraction auftretende Querdilatation = $^1/_3$ betrage die Gestaltänderung und daher auch die Elasticität nur $^2/_3$, so daß die Fl. für c die Gestalt annehme = $c\sqrt{(^2/_3\, e\,/\,d)}$. Dort wurde indeß auch ausgeführt, daß Helmholtz diese Erklärung bestreite, weil eine fest umschlossene flüssige Säule unmöglich die Querdilatation ausführen könne, daß jedoch die Röhrenwand einen Einfluß ausüben müsse, der von ihrer Elasticität und Dicke, sowie von dem Durchmesser der Röhre abhängig sein dürfte, sowie endlich, daß Kundts (1874) Versuche diese Ansicht bestätigten.

Reflexion des Schalles. Der Schall wird als Wellenbewegung nach dem Gesetze zurückgeworfen: der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel. **275**

So scharfe Nachweise, wie sie die Optik für das analoge Gesetz der Lichtreflexion beibringt, sind für dieses Gesetz der Akustik noch nicht gelungen. Mach (1873) hält solche für nicht möglich, weil nach dem Huyghens'schen Princip die Reflexion nur dann wellenbildend sein könne, wenn die Dimensionen der reflectirenden Fläche gegen die Wellenlänge groß sei, was wohl für das Licht immer, aber beim Schall nur für die höchsten Töne zutreffe. Indessen können doch mehrere Folgerungen aus dem Reflexionsgesetze leicht nachgewiesen werden und hiermit dieses selbst. Die Parabel hat bekanntlich die Eigenschaft, daß die Tangente mit dem Leitstrahl und einer zur Achse Parallelen gleiche Winkel bildet. Wenn demnach das Reflexionsgesetz für den Schall gilt, so müssen vom Brennpunkt eines parabolischen Spiegels ausgehende Schallstrahlen nach der Reflexion zur Achse parallel sein, was man leicht bestätigt findet; hält man in den Brennpunkt eines solchen Spiegels eine Taschenuhr, so hört man in der Achsenrichtung das Ticken in 10^m Entfernung. Noch deutlicher wird dasselbe, wenn dem ersten Spiegel parallel gegenüber ein zweiter aufgestellt wird, weil dieser die parallel zu seiner Achse auftreffenden Strahlen in seinem Brennpunkte vereinigt. Die Ellipse hat die analoge Eigenschaft, daß die Tangente mit den Leitstrahlen gleiche Winkel bildet; wenn also das Reflexionsgesetz für den Schall gilt, so müssen von dem einen Brennpunkte eines elliptisch begrenzten Raumes ausgehende Schallstrahlen im andern Brennpunkte vereinigt werden. Mach erzeugte in dem einen Brennpunkte eines elliptischen Gefäßes elektrische Funken; waren dieselben klein, so entstanden im andern Brennpunkte scharf gezeichnete Staubfiguren; starke Funken gaben nur diffuse Figuren und tiefe Knalle verschwommene Staubgestalten, weil dafür die reflectirenden Flächen zu klein waren. Bei den analogen Versuchen von Schellbach und Böhm (1879) entstand im andern Brennpunkt ein Staubhäufchen, von Staubringen umzogen. Als die Funken ganz nahe am Rande überschlugen, entstanden rings um die Peripherie gegen die Wand normale Staubripppchen, an der gegenüberliegenden Stelle aber eine stärkere Anhäufung, woraus ersichtlich ist, daß nach beiden Seiten am Rande der Ellipse Wellen herumlaufen, die an der diametralen Stelle interferiren. Auf diesen Erscheinungen beruhen die Flüstergewölbe und -Gallerien, wo man leise gesprochene, ja nur geflüsterte Worte an einer entfernten Stelle deutlich hört; die Paulskirche zu London, die Kirchen zu Glocester und Bex, ein Zimmer in der Pariser Sternwarte; im Theater zu Mainz kann man sich während der geräuschvollsten Zwischenacte am einen Ende der zweiten Logenreihe mit Personen am andern Ende derselben unterhalten, ebenso an den beiden Enden des langen Ganges hinter dem Rondel, während an der Wand dazwischen der Schall schwächer gehört wird. — Schellbach und Böhm fanden durch ihre Kohlenstaubversuche auch den aus dem Reflexionsgesetze folgenden Satz bestätigt, daß der Mittelpunkt einer reflectirten Kugelwelle so weit hinter der reflectirenden ebenen Wand liegt als der wellenerzeugende Punkt vor der Wand. Die Reflexion des Schalles ist die Ursache von Nachhall und Echo.

Entsteht ein Schall nahe an einer Wand, so fällt der reflectirte Schall noch mit dem directen zusammen und erzeugt eine Verstärkung desselben; ist die Schallquelle weiter von der Wand entfernt, jedoch weniger als 17^m, so entsteht der Nachhall; ist die Schallquelle weiter als 17^m von der Wand entfernt, so entsteht ein Wiederhall oder Echo, vorausgesetzt, daß der reflectirte Schall auch in das Ohr gelangen kann; doch scheinen diese Bedingungen zur Bildung des Echos nicht ausreichend zu sein, weil sonst diese Erscheinung viel häufiger sein müßte; wahrscheinlich ist eine solche Stellung der reflectirenden Gegenstände erforderlich, daß dieselben eine Art parabolischer oder elliptischer Form bilden, in deren Brennpunkt sich die reflectirten Schallstrahlen vereinigen und dadurch eine neue Schallquelle herstellen.

Das Ohr ist nämlich nicht im Stande, in der Sec. mehr als 10 articulirte Schalle getrennt zu empfinden. Wenn nun die reflectirende Wand sehr nahe, nur wenige Meter entfernt ist, so gelangt der reflectirte Schall in viel kürzerer Zeit als 0,1 Sec. nach dem

directen ins Ohr; er verschmilzt daher mit demselben und verstärkt ihn, worauf, abgesehen von der Resonanz, der stärkere Klang desselben Schalles in kleineren geschlossenen Räumen als im Freien beruht. Wenn aber die Wand etwas weiter, jedoch noch nicht 17m entfernt ist, so gelangt der reflectirte Schall etwas später als der directe, aber immer noch nicht 0,1 Sec. später ins Ohr; er bildet daher eine Verlängerung desselben, den Nachhall, der beim Reden, Singen u. s. w. die folgenden Silben verdeckt und daher undeutlich macht. Den Nachhall zu beseitigen, ist die Aufgabe der akustischen Bauart von Redehallen, Theatern u. s. w.; Regeln für dieselbe sind noch nicht bekannt. Je unregelmäßiger die Reflexion ist, desto akustischer scheint eine Halle zu sein; große glatte und ebene Flächen, regelmäßige Formen, wie Kugel- und Cylinderformen der Gebäude sind zu vermeiden, und die Wände sind möglichst reich zu gliedern. — Ist die Wand mehr als 17m entfernt, so haben der directe und der reflectirte Schall zusammen einen Weg von mehr als 34m zurückzulegen, wozu sie mehr als 34/333, also mehr als 0,1 Sec. Zeit nöthig haben; der reflectirte Schall gelangt mehr als 0,1 Sec. später ins Ohr als der directe, kann daher deutlich von demselben getrennt empfunden werden. Aus vielen verwirrten Wiederhallen scheint der Nachhall in großen Räumen zu bestehen. Weiter entfernte Gegenstände können zwei- oder mehrsilbige Echo erzeugen, vielfache Reflexionen können ein vielfaches Echo zur Folge haben. Berühmte Echo sind: Bei Adersbach in Böhmen (7 Silben 3 mal), im Schlosse Simonetta bei Mailand (ein Pistolenschuß 50 mal), am Lurleifelsen (17 fach), zwischen zwei Thürmen bei Verdun (13 fach), zu Genetay (nicht an der Schallquelle, sondern an einer andern Stelle hörbar). Nach Versuchen von Tyndall (1873) geht der Schall nur schwach durch dampfreiche Luft; folglich muß von solcher der Schall reflectirt werden; dasselbe gilt nach Tyndall (1875) von ungleichmäßig dichter und bewegter Luft und nach Cottrel (1874) von erhitzter Luft; hierdurch mag sich manches Echo auf dem Meere und manches andere unerklärte Echo erklären.

Wenn der Schallstrahl auf der reflectirten Wand senkrecht steht, so fällt der reflectirte Strahl mit dem directen zusammen und beide erzeugen durch Interferenz stehende Wellen mit Knoten und Bäuchen. Würde eine Welle in der Phase des Anlangens reflectirt, ein Berg als Berg, ein Thal als Thal, so müßten (s. 227. Fig. 140) die Knoten in $^1/_n$, $^3/_n$ ... des Strahles liegen. Schon der mit Sand gefüllte Gummischlauch beweist uns, daß hier die Bäuche liegen, die Knoten aber in $^2/_n$, $^4/_n$ u. s. w., daß also *bei der Reflexion an einem dichteren Medium die Phase um ½ Wellenlänge verschoben wird.* Rayleigh zeigte (1879), daß zwischen der Erregungsstelle eines hohen Pfeifentones und einer reflectirenden Wand eine sensitive Flamme an den Stellen 1, 3, 5 . . ., ein Ohr aber an den Stellen 2, 4, 6 . . . erregt wird; die sensitive Flamme aber wird von den bewegten Molekülen, also von den Bäuchen, das Ohr aber von den Stellen stärkster Druckveränderung, von den Knoten afficirt, also liegen die Knoten an den Stellen 2, 4, 6 . . ., die Schallwellen werden von dichteren Medien in umgekehrter Phase reflectirt. Man suchte früher in den Knoten absolute Wirkungslosigkeit; Königs Flammenzeiger, Langs Hörversuche an einer Pfeife u. A. zeigten aber, daß die Knoten die stärkste Hörwirkung haben. Berücksichtigt man dies, so zeigen auch die Versuche von Külp (1858) die Richtigkeit des Gesetzes der Phasenverschiebung.

276 **Brechung und Beugung des Schalles.** Unter der Brechung des Schalles versteht man die Erscheinung, daß die Schallstrahlen eine Ablenkung von ihrer Richtung erfahren, wenn sie in ein anderes Medium übergehen. Sie geschieht nach dem Brechungsgesetze (232.): der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem constanten Verhältnisse, das dem Verhältnisse der Schallgeschwindigkeit in beiden Medien (c : c′) gleich ist.

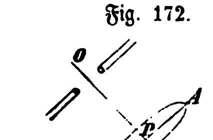


Fig. 172.

Durch die Versuche von Schellbach und Böhm ist es endlich (1879) gelungen, die Brechung des Schalles im Kleinen und die Geltung des Brechungsgesetzes nachzuweisen. Als Schallquelle wurde eine Collodiumhaut benutzt, die über einen Ring AB (Fig. 172) gespannt war und durch elektrische Funken, die bei O übersprangen, in Schw. versetzt wurde. In das Gefäß BCR wurde eine mit Kohle bestäubte Papiertafel DE gebracht; war dasselbe mit Luft gefüllt, so entstanden Staubringe, deren Mittelpunkt F in der Achsenrichtung des Ringes, also in der Fortpflanzungsrichtung des Schalles lag. Wurde aber das Gefäß mit Kohlendioxyd gefüllt, so lag das Centrum der Staubringe bei F′; hierdurch ist zunächst erwiesen, daß der Schall an der Grenzfläche BC bei dem Uebergange aus Luft in Kohlensäure gebrochen wird. Weiter sieht man aus dem Versuche, daß der Brechungswinkel kleiner ist als der Einfallswinkel, daß also der Schall bei dem Uebergange in das dichtere Medium zum Lothe gebrochen wird; endlich ergab die Lage des Punktes F′, daß

der Brechungsexponent $\sin\alpha : \sin\beta = c : c'$ ungefähr $^5/_4$ betrug. So groß muß er aber nach der Theorie der Brechung auch sein; denn die Dichten der zwei Luftarten verhalten sich wie 2 : 3 oder wie 16 : 24; also verhalten sich nach der Fl. $\sqrt{(e/d)}$ die Geschw. umgekehrt wie die Wurzeln aus diesen Zahlen, also wie 5 : 4. Aehnliches wurde auch für den Uebergang des Schalles aus Wasserstoff in Luft gefunden; die Brechung war jedoch gemäß der geringen Dichte des Wasserstoffs so stark, daß der Mittelpunkt der Ringe unter Umständen über den Gefäßrand hinausrückte.

Nach Reynolds (1875) ist die Wirkung des Windes auf den Schall eine Brechung im Großen. Die Geschw. des Windes ist nämlich am Boden immer geringer, oft nur halb so groß als in der Höhe, z. B. in der Höhe 10, am Boden 5^m; pflanzt sich nun ein Schall gegen den Wind fort, so wird die Verdichtungswelle in der Höhe um 10, am Boden nur um 5^m verzögert; die ursprünglich auf dem Boden senkrecht stehende Verdichtungswelle stellt sich daher schief und zwar mit dem unteren Theile vorwärts, so daß der ursprünglich wagrechte Schallstrahl nach oben abgelenkt, gebrochen, und dadurch mit anderen nach oben gerichteten Schallstrahlen vereinigt wird, was in der Höhe sogar eine Verstärkung des Schalles bewirken muß; der Schallstrahl, der sich mit dem Winde fortpflanzt, wird aus analogen Gründen nach unten gebrochen. Hieraus erklären sich manche früher dunkel gebliebenen Erscheinungen: warum der Schall gegen den Wind eine Strecke weit ganz deutlich ist und dann plötzlich verschwindet; warum man das Geläute einer Glocke mit dem Winde viel weiter hört, als man aus der Windgeschwindigkeit berechnen kann; warum man einen Schall oft in der Höhe besser hört als am Boden; warum über die glatte See der Schall weiter geht als über Land oder rauhe See; warum ein leichter Wind den Schall auf der See nicht beeinflußt, das rollende Echo und das Donnergerolle u. s. w. Ja sogar die Tyndall'schen Erscheinungen erklären sich durch diese Brechung; denn in der feuchten und heißen Luft am Boden pflanzt sich der Schall schneller fort als in der kühleren und trockneren Höhe, es muß also der Schallstrahl nach oben abgelenkt und sonach unten geschwächt werden; bei Regen, Schnee u. s. w. ist aber die Luft oben und unten gleichmäßig, weßhalb keine Brechung stattfindet. Ob die letzteren Folgerungen richtig sind, soll noch durch Versuche bestätigt werden; wenn nämlich die Brechung wirklich die Ursache des Verschwindens des Schalles auf der See wäre, so müßte derselbe auf den Masten wieder hörbar werden. Dies ist allerdings schon früher von Henry in N.-A. beobachtet worden, der überhaupt die Brechung des Schalles für häufiger und einflußreicher hält, als es gewöhnlich geschieht.

Die Beugung des Schalles ist die bekannte Erscheinung, daß man den Schall auch hinter festen Körpern hört, die zwischen dem Ohr und der Schallquelle sich befinden. In den meisten Fällen rührt dies nicht davon her, daß sich der Schall auch durch feste Körper fortpflanzt, sondern von einer Umbiegung der Schallstrahlen an den Grenzen der festen Körper. Wenn z. B. eine Musikbande eine Hauptstraße entlang zieht, so hört man in einer Seitenstraße die Musik schon, bevor sie an der Straßenmündung angelangt ist, in diesem Augenblicke erfährt sie eine plötzliche Verstärkung, die beim Unsichtbarwerden der Bande hinter der folgenden Häuserreihe verschwindet und dem schwächeren Tönen Platz macht, das erst in einiger Entf. aufhört. Die Schallstrahlen treffen nämlich auch die Luftmassen an der Straßenmündung und erzeugen hier Elementarwellen, die sich in der Seitenstraße zu einer fortschreitenden Welle vereinigen; da die Dicke des Strahlenbündels, das jene Luftmassen trifft, rasch abnimmt, so ist die Schwächung und die starke Abnahme bei zunehmender Entfernung leicht erklärlich. Nach der Theorie der Beugung der Wellen (371.) folgen in dem seitlichen Raume nach dem ersten wirksamen Beugungsraume solche Stellen, wo sich die gebeugten Strahlen schwächen oder stärken; da die Breiten dieser Streifen mit der Wellenlänge wachsen und diese beim Schalle im Verhältnisse zum Lichte sehr groß ist, so sind unter gewöhnlichen Umständen jene Stellen für den Schall nicht wahrnehmbar, alles ist von dem ersten wirksamen Beugungsraume erfüllt; wegen der unendlichen Kleinheit der Lichtwellen ist dieser erste Raum beim Lichte für die gewöhnliche Wahrnehmung verschwindend, weßhalb man nicht ums Eck sehen, wohl aber hören kann, weßhalb der Lichtschatten scharf begrenzt, der Schallschatten aber nur durch die Schwächung angedeutet ist. Daß dennoch eine Beugung der Lichtstrahlen stattfindet, wird in der Optik unzweifelhaft; beruht ja auf derselben die schon 1715 von Delisle beobachtete Erscheinung, daß in der Mitte des Schattens eines kleinen, kreisrunden Schirmes ein heller Fleck auftritt, ein Versuch, dessen akustisches Analogon erst (1882) dem ausgezeichneten englischen Akustiker Rayleigh gelungen ist. Da im Wasser die Geschwindigkeit, also auch die Wellen des Schalles viel größer sind als in der Luft, so muß nach der Theorie der Beugung der Schallschatten im Wasser noch weniger scharf sein als in der Luft. Nur wenn es gelänge, einen Schall von momentaner Dauer, also von sehr kleiner Wellenlänge zu erzeugen, müßte der Schallschatten im Wasser scharf sein; dieser Gedanke wurde von Leconte in San Franzisko realisirt. Wie das American Journal of Science (1882) erzählt, nahm derselbe Sprengungen im Meere mit Nitroglycerin vor, dessen Explosion bekanntlich instantan ist; im geometrischen Schallschatten eines

benachbarten Pfeilers blieben eingetauchte Flaschen ganz, während sie außerhalb in Atome zersplittert wurden; in Papier eingewickelte Glasröhren, die senkrecht zur Grenze des Schattens ins Wasser getaucht waren, wurden in der äußeren Hälfte zertrümmert, während die innere Hälfte unverletzt blieb.

277 **Das Doppler'sche Princip** (1842). Wenn eine tönende Tonquelle und das Ohr sich einander nähern, so hört man den Ton höher als er ist; wenn aber die Tonquelle und das Ohr sich von einander entfernen, so hört man den Ton tiefer als er ist.

Beweis und **Nachweise.** Wenn die Tonquelle und das Ohr ruhen, so gelangen an das Ohr in jeder Sec. n Verdichtungswellen, vorausgesetzt, daß der Ton per Sec. n Schw. hat; nähert sich aber das Ohr der Tonquelle, so empfängt es mehr Verdichtungen, gerade so wie ein Schiff mehr Wellenberge durchfurcht, wenn es denselben entgegenfährt, als wenn es ruht. Umgekehrt weicht das Ohr einer Anzahl von Verdichtungen aus, wenn es sich von der Tonquelle entfernt. Im ersten Falle ist also der Erfolg gerade so, als ob das Ohr mehr Schw. per Sec. empfangen hätte, im zweiten so, als ob weniger Schw. in das Ohr gelangt wären; im ersten Falle erscheint ein Ton höher, im zweiten tiefer als er ist. Ist z. B. im ersten Falle die Strecke, um die sich das Ohr in 1 Sec. nähert $= s$ und die Wellenlänge $= l$, so liegen auf dieser Strecke s/l Wellen, oder auch ns/c Wellen, weil $l = c/n$ ist. Es empfängt also das Ohr nicht nur die n Schw. des ursprünglichen Tones, sondern noch ns/c dazu; folglich ist die Schwz. $n' = n + ns/c = n(1 + s/c)$; für ein sich entfernendes Ohr ist $n' = n(1 - s/c)$. Leicht ergibt sich Aehnliches für das Nähern oder Entfernen der Tonquelle. — Nähert sich eine pfeifende Locomotive, so hört man deutlich das Höherwerden, und beim Entfernen das Tieferwerden des Tones. Buys-Ballot stellte (1845) an der Utrecht-Maarsen-Bahn Trompeter auf, nahm auch solche mit auf die Locomotive, und ließ durch feinhörige Musiker die Höhe der sich nähernden oder sich entfernenden Töne mit den constanten vergleichen; er fand so das Princip wie die Formel bestätigt. Mach ließ (1861) ein sehr langes Rohr, das an seinem Ende ein Pfeifchen trug, sich um eine durch die Mitte der Länge gehende Achse drehen und bemerkte beim Nähern und Entfernen Schwebungen des Tones. Rollmann (1871) befestigte an einer Schwungmaschine eine lange Stange, die an ihrem äußeren Ende eine große Glaskugel mit einer angeschliffenen Oeffnung trug, welche durch einen tangentialen Luftstrom wie ein Brummkreisel angeblasen werden konnte: bei der raschen Drehung blies dieselbe sich selbst an, und erhöhte und erniedrigte ihren Ton bei jeder Umdrehung einmal, wenn der Beobachter in der Richtung der Stange stand. Alfred Mayer hat (1872) zahlreiche Versuche mit 2 Stimmgabeln angestellt, durch welche alle Folgerungen des Princips bestätigt wurden; regte z. B. die eine Stimmgabel, wenn sie in größerer Entfernung stand, die andere zum Mittönen an, so verschwand der Ton der letzteren, wenn die erstere derselben genähert wurde. Vogel hat (1875) mit dem Pfeifenton einer fahrenden Locomotive genauer messende Versuche angestellt und die Thatsachen und Fln. bestätigt, besonders das Gesetz, daß die Veränderung der Tonhöhe um so beträchtlicher ausfällt, je größer die Geschw. der Bewegung ist. Schüngel kam zu denselben Resultaten durch die Beobachtungen der Veränderungen der Schwebungen zweier Stimmgabeln, wenn dieselben gegeneinander bewegt wurden. Quesneville erklärte (1879) die Ungenauigkeiten, die in diesen Untersuchungen noch vorlagen, durch die subjectiven Beobachtungen, und beseitigte dieselben, indem er die Stimmgabeln ihre Bewegungen und Schw. graphisch fixiren ließ. Er kam dann zu dem Resultate, daß die Fln. $n \pm s/l$ noch durch eine negative constante, aber von n abhängige Größe ergänzt werden müssen, die z. B. für $n = 500$ nur 0,05 betrage, so daß die Abweichung von Dopplers Princip nur $^1/_{10000}$ ausmache. Auf die genaue Feststellung des Princips legen die Forscher so hohen Werth, weil dasselbe in der physikalischen Astronomie von Bedeutung geworden ist, und zwar besonders deßhalb, weil man aus der Veränderung der Schwz. die Geschw. des Näherns oder Entfernens berechnen kann. Nach Weinholds „physikalischen Demonstrationen" (1881) läßt sich das Princip einer größeren Anzahl von Menschen mit einer sehr hohen Stimmgabel (2046 Schw.) demonstriren, wenn diese durch breite Seitenflächen einen starken Ton gewinnt; bewegt man sie mit einer Geschw. von etwa 1^m nahe an einer Wand zu derselben hin, so erfahren der directe und der von der Wand reflectirte Ton durch das Doppler'sche Princip entgegengesetzte Veränderungen, so daß man deutlich 12 Schwebungen hört.

278 **Akustische Anziehung und Abstoßung.** Guyot beobachtete (1834), daß ein leichtes aus einem quadratischen Papierscheibchen bestehendes Pendel von einem transversal schwingenden Stabe angezogen wird, wenn die Ebene des Papiers mit der Schwingungsebene parallel ist, dagegen abgestoßen, wenn diese Ebenen aufeinander senkrecht stehen. Schellbach sprach (1870) den Satz aus: die Schallschw. eines elastischen Mittels ziehen specifisch schwerere Körper nach dem Mittelpunkte der Erschütterung und stoßen specifisch leichtere ab; z. B. ein luftgefüllter Ballon von Goldschlägerhaut wird an der offenen Seite des Resonanzkastens

einer tönenden Stimmgabel angezogen, ein wasserstofferfüllter abgestoßen. Dvorak hat seit 1875 eine ganze Reihe ähnlicher Erscheinungen beobachtet und theilweise auch erklärt; er bewies mathematisch, daß, wenn die Amplitude einer schwingenden Luftsäule nicht gegen die Wellenlänge verschwinde, in dem Knoten ein kleiner Ueberdruck gegen den äußeren Luftdruck herrsche, der auch durch Manometerversuche nachweisbar sei und erst im Bauche nahezu gleich Null werde. Also ist dieser Ueberdruck in einem einseitig offenen Resonator, dessen offene Seite einer Schallquelle zugekehrt ist, ebenfalls vorhanden und verursacht Luftströmungen in demselben; in Folge dieses Ueberdrucks wird der Resonator von der Schallquelle abgestoßen. Am leichtesten gelingen die Versuche mit einem cylindrischen Resonator aus steifem Zeichenpapier, der horizontal an einem Ende eines Holzleistchens befestigt wird, das mit einem Glashütchen auf einer Nadelspitze drehbar aufgehängt und am anderen Ende durch ein Bleiringelchen balancirt ist; nähert man demselben das offene Ende des Resonanzkästchens einer Stimmgabel, so wird er selbst in einer Entf. von 10^{cm} noch abgestoßen. Kehrt der Resonator sein geschlossenes Ende dem Kästchen zu oder ist sein Eigenton stark gegen den der Gabel verstimmt, so findet Anziehung statt. Mittels der akustischen Abstoßung läßt sich leicht ein akustisches Reactionsrad, das an den Enden von 4 Armen Resonatoren trägt, in Rotation versetzen, was Alfred Mayer schon 1876 gelungen sein soll; auch glaubt Dvorak, daß eine hierauf gegründete akustische Drehwage zur Vergleichung der Stärke von Tönen gleicher Schwz. dienen könne.

Aufg. 441. Ein Brunnen ist 100^m tief; nach wieviel Sec. hört man einen Stein aufschlagen? Aufl.: $1/2 . 9{,}808 . x^2 = 100$; hieraus die Fallzeit $x = 4{,}5$; die Schallzeit $= 100 / 333 = 0{,}3$; daher die gesuchte Zeit $= 4{,}8$ Sec. — A. 442. Wie tief ist ein Schacht, in welchem man einen Stein nach 6 Sec. aufschlagen hört? Aufl.: Die Fallzeit sei x, dann ist $1/2 . 9{,}808 . x^2 = 333 (6 - x)$; hieraus $x = 5{,}55$ Sec.; daher der Fallraum $= 151^m$. — A. 443. Wie weit ist ein Gewitter entfernt, wenn der Donner 20 Sec. nach dem Blitze beginnt? Aufl.: 6660^m. — A. 444. Eine Truppencolonne von 1000^m Länge schießt genau in demselben Augenblicke ihre Gewehre ab; wie lange dauert das Geknatter für einen Beobachter, der am einen Ende steht? Aufl.: $3^1/_3$ Sek. — A. 445. Wenn man annimmt, daß die Dauer des Donners von der Länge des Strahles herrührt, wie lang ist dann der Blitz, dessen Donner 1 Min. rollt? Aufl.: 19980^m. — A. 446. Wie groß ist die Schallgeschw. im Leuchtgas; sp. G. 0,5? Aufl.: 471^m. — A. 447. Wie groß ist dieselbe im Quecksilber? Aufl.: Nach 274. $= 1576^m$. — A. 448. Ein Gußstahldraht von 7,7 sp. G. und 20000^{kg} Elasticitätsmodul hat welche Schallgeschw.? Aufl.: Fl. $c = \sqrt{(eg / s)} = 5047^m$. — A. 449. Ein Silberstab von $0{,}4^m$ Länge gibt an einem Ende festgeklemmt und gerieben den Ton a_3; wie groß ist die Schallgeschw.? Aufl.: 2784^m. — A. 450. Wie groß ist die Schallgeschw. in der Luft bei 3000° C.? Aufl.: Nach Fl. (40) ist $c = 1155^m$. — A. 451. Wie schnell muß sich ein Ohr dem Tone a_1 nähern, um h_1 zu hören; wie schnell um die Octave zu hören; wie, um nichts zu hören? Aufl.: $41^5/_8{}^m$, 333^m per Sec. nähern, 333^m per Sec. entfernen. — A. 452. Die Schwz. für eine sich um s per Sec. nähernde oder entfernende Tonquelle, die an sich n Schw. gibt, zu entwickeln? Aufl.: $n' = nc / (c \mp s)$. — A. 453. Eine Locomotive pfeift c_4 und nähert sich mit 16^m Geschw.; welchen Ton hört man? Aufl.: 2193 Schw., beinahe cis_4. — A. 454. Eine Locomotive pfeift c_2 und entfernt sich mit 20^m Geschw.; welchen Ton hört man? Aufl.: 492, beinahe h_1. — A. 455. Wie schnell nähert sich eine Locomotive, deren Schwz. n auf n' erhöht wird? Aufl.: $s = c (n' - n) / n'$. — A. 456. Der Ton n einer sich entfernenden Locomotive wird um u Schw. erniedrigt; wie groß ist ihre Geschw.? Aufl.: $s = uc / (n - u)$. — A. 457. Der Hörer fährt von einem Tone von n Schw. weg und hört ihn um u Schw. tiefer; wie groß ist seine Geschw.? Aufl.: $s = cu / n$.

Sechste Abtheilung.

Die Lehre vom Lichte oder die Optik.

1. Definition der Optik.

Begriff und Wesen des Lichtes. Das Licht ist die Kraft, welche uns die Körper sichtbar macht, wenn es entweder von den Körpern selbst erzeugt wird, oder wenn es auf dieselben fällt und von ihnen zurückgeworfen wird. Körper, welche selbständig Licht erzeugen, werden selbstleuchtend oder Lichtquellen genannt; diejenigen Körper aber, welche erst durch fremdes Licht sichtbar, lichtgebend, leuchtend werden, nennt man dunkle Körper. — Das Licht besteht aus transversalen Schwing- 279

ungen des Aethers, deren Anzahl in einer Secunde 400 bis 800 Billionen beträgt. Jede dieser verschiedenen Schwingungszahlen bedingt den Eindruck einer bestimmten Farbe; wenig verschiedene Schwingungszahlen aber erzeugen auch nur wenig verschiedene Farben; die geringste Schwingungszahl von 400 Billionen kommt dem Roth zu; dann folgen Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett, das aus der größten Zahl von Aetherschwingungen besteht. Im gewöhnlichen Lichte stehen die Aetherschwingungen nach allen nur denkbaren Richtungen auf dem Strahle senkrecht; sind aber die Schwingungen einander parallel, so zeigt das Licht außergewöhnliche Eigenschaften und wird polarisirtes Licht genannt.

Diese Ansicht über das Wesen des Lichtes ist nur eine Hypothese, die man die Undulationstheorie des Lichtes nennt, und für welche Huyghens (1690) den ersten Grund legte; im vorigen Jahrhundert hatte sie nur den großen Euler als Verfechter; bei den übrigen Naturforschern war die Emanationstheorie Newtons (1692) in allgemeiner Geltung, welche das Licht als einen höchst feinen, den leuchtenden Körpern entströmenden Stoff betrachtete. Den stärksten Stoß erhielt diese Theorie durch die Interferenzerscheinungen (7.), welche gleichzeitig die Hauptstütze der Undulationstheorie wurden. In neuerer Zeit (1854) hat Foucault eine Thatsache gefunden, die der Emanationstheorie direct widerspricht; nach dieser Theorie ist nämlich das Brechungsgesetz (Fl. 31) nur möglich, wenn das Licht in dem dichteren Medium sich schneller fortpflanzt als in dem dünneren; Foucault hat aber durch höchst sorgfältige Versuche gefunden, daß die Geschw. des Lichtes im Wasser nur $^3/_4$ von der in der Luft ist, eine Thatsache; die der Undulationstheorie nicht blos entspricht, sondern von derselben längst angenommen, ja sogar theoretisch entdeckt worden war. Denn es war längst bekannt, daß bei dem Uebergange des Lichtes aus Luft in Wasser der Sinus des Einfallswinkels zu dem des Brechungswinkels sich wie 4 : 3 verhalte; nach der Undulationstheorie (232.) ist aber dieses Verhältniß gleich dem Verhältnisse der Geschw. Die Undulationstheorie hatte also die Entdeckung Foucaults längst vorausgesagt; ebenso kann sie auch jetzt noch Vieles voraussagen; so z. B. daß man bei directer Messung die Geschw. des Lichtes im Glase = $^2/_3$ von der in der Luft finden wird. — Fresnel entdeckte (1817) durch Rechnung auf dem Grunde der Undulationstheorie die circulare Polarisation des Lichtes mit allen ihren Consequenzen, ohne daß Jemand eine Spur dieser Erscheinungen gesehen hatte, während sie sofort nach der theoretischen Entdeckung durch Versuche Jedermann offenbar wurden, und jetzt praktisch wichtig und z. B. in Zuckerfabriken Jedem geläufig sind. Wenn nämlich ein Pendel in seiner höchsten Lage senkrecht zu seiner Schwingungsebene einen Stoß erhält, so muß es einen Kreis oder eine Ellipse beschreiben; ebenso müssen zwei senkrecht auf einander treffende Aetherschw., von denen die eine in der Phase um $^1/_4$ der Schwingungsdauer voraus ist, eine kreisförmige oder elliptische Schw. hervorrufen, also circular polarisirtes Licht erzeugen. Dieses Licht, daß sich auffällig von dem gewöhnlichen und von dem geradlinig polarisirten Lichte unterscheidet, und dessen Eigenschaften in keiner Weise mit der Emanationstheorie erklärlich sind, ist ein Product der Undulationstheorie; ebenso sind manche Erscheinungen der Spectral-Analyse aus der Theorie gefolgert und durch Versuche bestätigt gefunden worden. Solche Gründe sprechen für die Undulationstheorie; außerdem gelingt es, mittels derselben alle Lichterscheinungen ungezwungen sowohl der Art als der Größe nach abzuleiten und zu erklären, so daß kein Physiker mehr an der Wahrheit derselben zweifelt. Schließlich zeigte Feußner (1877), daß Newtons Theorie der Anwandlungen, die zur Erklärung der Farben dünner Blättchen aufgestellt wurde, zu gänzlich unrichtigen Folgerungen führt.

Das Licht unterscheidet sich demnach vom Schalle durch den Stoff der Schw. (hier Aether, dort Körperstoff), durch die Richtung der fortpflanzenden Schw. (hier transversal, dort longitudinal), durch die Zahl der Schw. (hier 400—800 Bill., dort 14—40000) und durch die Amplitude der Schw. (hier unendlich klein, dort meßbar groß). Außerdem pflanzt sich das Licht sehr viel schneller fort als der Schall (40000 M., dort 333^m in der Luft); das Licht geht in dichteren Körpern langsamer, der Schall schneller voran als in der Luft. Beide stimmen darin überein, daß unter und über den angegebenen Schwzn. die Empfindung von Auge und Ohr zu Ende ist, sodann darin, daß die verschiedenen Schwzn. verschiedene Empfindungen erzeugen (hier die verschiedenen Farben, dort die verschieden hohen Töne).

2. Entstehung des Lichtes.

280 **Die Lichtquellen.** Die Quelle alles Lichtes, mit Ausnahme des Fixsternlichtes, ist die Sonne; denn auch die irdischen Lichtquellen verdanken ihr Licht der Sonne. Nach Bouguer (1725) ist das Sonnenlicht gleich dem von 11664 Wachs-

kerzen in 43cm Entfernung, und Millionen, ja Billionen mal so stark als das Licht der Fixsterne. — Die irdischen Körper werden zu Lichtquellen, wenn sie bis zu einer gewissen Temperatur erhitzt werden; nach Draper (1847) fangen alle Körper bei 525° an zu glühen und zwar mit rothem Lichte und erreichen bei 1170° die Weißgluth. Die gewöhnlichen irdischen Lichtquellen beruhen auf der durch Verbrennung entstehenden Hitze, durch welche in der Flamme schwebende Theilchen fester Stoffe zur Gluth gebracht werden. Auch der elektrische Strom und der elektrische Schlag (Funken und Funkenstrom) können so hohe Temperaturen und so heftige Erschütterungen erzeugen, daß hierdurch Licht entsteht.

Die Leuchtkraft des Vollmondes oder die Intensität oder Stärke des Mondlichtes ist nach Zöllner der 600 000ste Theil von der des Sonnenlichtes, die von α Centauri nach Herschel der 16 000 Millionte Theil, die des Sirius nach Wollaston der 20 000 Millionte Theil, die des Jupiter der 5000 Millionte Theil und die des Neptun der 80 Billionte Theil von der Intensität des Sonnenlichtes (Zöllners Astrophotometer). Das stärkste irdische Licht, das elektrische Kohlenlicht, hat bei Anwendung von 50 Bunsen'schen Elementen, 1/4 der Stärke des Sonnenlichtes, während das Drummond'sche Kalklicht oder Siderallicht nur 1/16 dieser Stärke erreicht; stark ist auch das künstliche Licht des in reinem Sauerstoff brennenden Phosphors, sowie das Magnesium- und das Zinkmagnesiumlicht. Mittels der neuen magnetelektrischen Maschinen (Lichtmaschinen) kann man elektrisches Licht von 1—100 000 Normalkerzen Lichtstärke, also stärkeres wie das Sonnenlicht erzeugen.

Die Ursache des Sonnenlichtes ist die hohe Temperatur dieses Weltkörpers; nach neueren Forschungen herrscht auf der Sonne eine Hitze von Hunderttausenden von Graden, die sich entweder durch Zusammenziehung der Sonne oder durch Einstürzen kleinerer Weltkörper, Meteoriten und Kometen, oder durch beide Wirkungen zugleich noch in undenkliche Zeiten zu erhalten scheint. Folglich sind die Sonnenmoleküle in Schw. bis über 1000 Bill. per Sec. begriffen; diese Schw. übertragen sich auf den Aether der Sonne und pflanzen sich so nach den Gesetzen der Wellenbewegung durch den Aether des Weltraumes nach allen Richtungen fort. — Die Ursache des Glühlichtes der irdischen Körper liegt ebenfalls in ihrer Wärme; denn bekanntlich besteht dieselbe bei den festen und flüssigen Körpern aus Schw. der Mol., welche bei steigender Temperatur nicht blos an Weite, sondern bei vielen Mol. auch an Zahl zunehmen; denn geht die Amplitude eines Mol. über eine gewisse Grenze hinaus, so stößt es gegen andere, es kann seine Schw. nicht vollenden, seine Schwingungsdauer wird kleiner, die Schwz. größer. Bei 525° ist so die Schwz. bis zu 400 Bill. gestiegen, bei 655° haben sich orangefarbige, gelbe, grüne Gluthen darunter gemischt, mit 800° sind auch blaue Gluthen entstanden und bei 1170° sind alle noch möglichen Stufen des Violett hinzugetreten, und so entsteht durch Mischung aller Farbengluthen die Weißgluth. — Die Verbrennung ist eine chemische Vereinigung, d. i. ein Zusammentreten verhältnißmäßig sehr weit von einander entfernter Atome zu größtmöglicher Nähe vermöge der Anziehung der Atome gegen einander; da diese Anziehung bei wachsender Annäherung immer größer wird, so steigt die Geschw. in vervielfachtem Maße; bei größtmöglicher Annäherung aber ist die fortschreitende Bewegung plötzlich zu Ende, die ganze producirte Arbeit verschwindet und muß daher in Schw., in Wärme verwandelt werden, mit deren Erhöhung die Lichtentwickelung verbunden ist.

281 **Die Phosphorescenz** ist das Leuchten von Körpern unterhalb der Temperatur des Glühens oder Verbrennens; es ist meist nur im Dunkeln sichtbar. Das Phosphoresciren hat verschiedene Ursachen: 1. Langsame Oxydation: das Leuchten des Phosphors, der Leuchtpflanzen und Leuchtthiere; auch das Phosphoresciren von Holz, Laub, Fleisch, Fisch, Milch, Schweiß in einem gewissen Zustande der Zersetzung rührt von photogenen Bacterien oder anderen Leuchtpilzen her. 2. Insolation, d. i. Bestrahlung durch Sonnenlicht, elektrisches Licht oder ein anderes künstliches Licht; auch unsichtbare elektrische Strahlen erzeugen Phosphorescenz; hierher gehören die natürlichen und künstlichen Phosphore, also auch die Balmain'schen (1878) und die Gädicke'schen (1881) Leuchtfarben. Diese neuen künstlichen Phosphore sind den alten darin überlegen, daß sie von Wasser und Luft nicht angegriffen werden. 3. Wärme: die natürlichen und künstlichen Phosphore, manche Metalle, Dämpfe von Aether, Schwefel, Selen, Arsen. 4. Mechanische Processe: Kiesel, Zucker, Kreide, Glimmer leuchten beim Zerschlagen oder Spalten.

Der Name Phosphorus kommt schon bei den alten Griechen für den Planet Venus als Morgenstern vor; ganz entsprechend wurden später die im Dunkeln leuchtenden Steine Phosphore genannt; vom Diamant war die Erscheinung schon Albertus Magnus (1193—1280) bekannt; vom Bologneser Schwerspath wurde sie 1630 zuerst von Vincenzio Cascariolo beobachtet. Als 1669 Brand und Kunkel in Hamburg den ausnehmend stark im Dunkeln leuchtenden Stoff aus dem Harn darstellten, den 100 Jahre später Scheele billiger und reichlicher aus Knochen zu gewinnen lehrte, gab man demselben den Eigennamen Phosphor, während der Gattungsname Phosphore für leuchtende Stoffe immer noch gebräuchlich ist.

Ad 1. Die Ursache des Phosphorleuchtens war lange streitig; da es nur in sauerstoffhaltigen Räumen stattfindet, da sich hierbei phosphorige Säure $H_3 PO_3$ bildet und da der aufsteigende Dampf Ozon und Wasserstoffsuperoxyd enthält, so steht jetzt fest, daß das Phosphorleuchten durch die langsame Oxydation des Phosphordampfes entsteht, die durch das langsam vom Phosphor erzeugte Ozon geschieht. Inzwischen wurde auch erkannt, daß das Leuchten von Pilzen, von Holz u. s. w. nur bei Gegenwart von Sauerstoff stattfindet, daß es mit fortschreitender Fäulniß abnimmt, und daß speciell das Leuchten der sich zersetzenden organischen Stoffe, wie Holz, Fleisch u. s. w. von leuchtenden Bacterien herrührt; demnach war nur noch die Phosphorescenz der Leuchtpflanzen und Leuchtthiere durch Oxydation zu erklären. Dies scheint (1880) Radziszewski gelungen zu sein. Bekannt ist schon länger, daß zahlreiche organische Verbindungen ebenso wie der Phosphor die Fähigkeit haben, bei langsamer Oxydation Ozon und Wasserstoffsuperoxyd zu bilden, wobei einige das Ozon absorbiren. Radziszewski zeigte nun, daß viele ätherische Oele, wie Terpentinöl, aromatische Kohlenwasserstoffe, Fettkörper, besonders fette Oele, und auch manche Alkohole in alkalischer Reaction phosphoresciren, indem sie sich mit dem durch sie gebildeten Ozon oxydiren. Da nun von jenen organischen Körpern einer oder der andere in den Leuchtpflanzen und Leuchtthieren neben organischen Basen enthalten ist, so sind hiermit die Bedingungen des Selbstleuchtens durch das Ozon erfüllt. Bestätigt wird diese Theorie durch die Beobachtung Schullers (1881), daß Ozon selbst bei seiner Zersetzung phosphorescirt, und die Entdeckung Ludwigs (1882), daß auch einheimische, sonst nicht phosphorescirende Pilze zu der Zeit leuchten, wo ihre Mycelien Rhizomorphen oder Skleretien oder neue Mycelien bilden, wo also die Thätigkeit zur Aufnahme der Nährstoffe die lebhafteste ist. Manche ausländischen Pilze leuchten sehr stark, so der in der Provence am Fuße der Oelbäume wachsende Agaricus olearius, dessen Leuchten während der Vegetation selbst bei Tage sichtbar ist; Bestrahlung durch die Sonne verstärkt dasselbe nicht, in ausgekochtem Wasser, im Vacuum, in reiner Kohlensäure leuchtet er nicht, im Leuchten entwickelt er mehr Kohlensäure als beim Nichtleuchten, was auch alles für die Oxydation spricht; dieser stärkst leuchtende Pilz spricht durch seinen Reichthum an Fettkörpern und seinen Gehalt an Cholin, einer organischen Basis, für die Oxydation durch Ozon. Das Meeresleuchten, die großartige und wundervolle, alle Seereisenden entzückende Erscheinung ist hiermit ebenfalls erklärt; denn auch die kleinen Seethiere enthalten jene Ozon bildenden Stoffe und Basen, und daß von ihnen das Meeresleuchten herrührt, hat erst neuerdings W. E. Koch (1881—82) durch die Beobachtung bestätigt, daß im Frühling und Herbst, wo das Wasser mit embryonischen Formen fast erfüllt ist, das Licht sein Maximum hat; für die Ozonbildung spricht auch das stärkere Leuchten bei Gewittern und in den Tropen, da die meisten organischen Stoffe zum Phosphoresciren einer höheren Temperatur bedürfen.

Ad 2. Die Phosphorescenz durch Insolation soll noch viel älter sein als die Kenntnisse des großen Albert von Bollstädt und die Beobachtung des Bologneser Schusters; die Chinesen und Japanesen sollen schon vor 2000 J. Götzenbilder hergestellt haben, die bei Tage unsichtbar und bei Nacht sichtbar waren. Natürliche Phosphore oder Lichtsauger wurden nach dem Schwerspath noch viele entdeckt; am stärksten ist der Chlorophan von Nertschinsk, der 10 Tage lang nachleuchtet; auch andere Flußspathe, dann die Calciumsulphate Fasergips und Alabaster, die Calciumcarbonate Arragonit, Marmor, Kalkspath, Kreide, Kalksinter, das Strontiumcarbonat Strontianit, das Bariumcarbonat Witherit sind Lichtsauger; schwächer phosphoresciren manche organischen Stoffe: Weinsäure, Stärkemehl, Gummi arabicum, Hausenblase, Leim, gebleichte Leinwand und Baumwolle, jedoch nur in sehr trockenem Zustande; noch schwächer manche Salze, wie Salpeter, Glaubersalz, Borax u. s. w. Viel stärker sind die künstlichen Leuchtsteine. Wie die besten natürlichen Phosphore die Sulphate und Carbonate der Erdalkalimetalle sind, so sind die künstlichen Sauger Gemenge jener Stoffe mit den Schwefelverbindungen derselben Metalle; nach Gädicke (1881) bestehen sie aus einem Erdalkalimetall, Schwefel, Sauerstoff und etwas Wasser; die reinen Schwefelverbindungen dieser Metalle leuchten nicht; außerdem ist die chemische Zusammensetzung nicht allein entscheidend, sondern ein gewisser molekularer Zustand ist wesentlich, der bei den älteren Saugern durch Glühen erreicht wurde; Gädicke ist es gelungen, denselben auch durch Benutzung chemisch reiner Materialien herzustellen; indessen ist die Darstellung seiner, wie der Balmain'schen Leuchtfarben noch Fabrikgeheimniß. Die chemische Be-

schaffenheit tritt uns geschichtlich zuerst in *Cantons Leuchtstein* entgegen; derselbe wurde durch Glühen von calcinirten und gepulverten Austernschalen mit Schwefelpulver hergestellt, wodurch ein Gemenge von Schwefelcalcium mit Calcium-Sulphat und -Carbonat entstand; eine der Canton'schen Röhren mit der Jahreszahl 1764 hat ihre Leuchtkraft ungeschwächt bis jetzt bewahrt. Der Canton'sche Phosphor leuchtet 10 St., wenn er dem Lichte 10 Sec. ausgesetzt war, nach einer Verbesserung von Grotthuß sogar 5 T.; Wach nahm noch Schwefelarsen oder Schwefelantimon dazu und erhielt so starke Phosphore, daß ihr Leuchten bei Tage sichtbar war; die Canton'schen Phosphore strahlen ein hellgelbes, rosenrothes oder blaßviolettes Licht aus. Der *Bononische Leuchtstein* wird durch Glühen von Schwerspath mit Traganth dargestellt und leuchtet nach der Darstellung von Daguerre 48 St. mit hellgelbem Lichte; künstliches Bariumsulphat mit Kohle geglüht gibt einen orangerothen Phosphor. Die *Seelhorst'schen Leuchtsteine* sind meist Strontiumpräparate und haben nach der Darstellungsweise verschiedene Farben: Grün leuchtet der Phosphor, der durch Glühen von unterschwefligsaurem Strontium erhalten wird; blau leuchtet er, wenn Strontiumsulphat in einer Atmosphäre von Wasserstoff geglüht wird; hellgelb, wenn dies nur kurze Zeit geschieht; orangefarbig, wenn ein Gemisch von kohlensaurem und schwefelsaurem Barium mit Kohle in Gluth erhalten wird. Die *Balmain'schen Leuchtfarben* sind Gemische von Calciumsulphat und Schwefelcalcium mit einem leimigen Bindemittel z. B. Albumin, und werden mit Wasser, Oel oder einem hellen Lack zu Anstrichfarben angemacht; ihr bläulichweißes Leuchten dauert höchstens 19 St. Es gibt jetzt schon einige Fabriken von Leuchtfarben; dieselben liefern nicht nur hübsche Spielereien, wie im Dunkeln blau leuchtende Kornblumen, leuchtende Schmetterlinge, bunte Blumensträuße, im Dunkeln sichtbare Photographieen, die durch ihr eigenes Licht Abdrücke ermöglichen, Bildsäulen, die in der Dunkelheit aus geisterhaftem Lichte gewebt erscheinen und ihre Umgebung erhellen, sondern auch nützliche Dinge, wie leuchtende Zifferblätter für Taschen- und Wanduhren, leuchtende Streichholzbüchsen, Straßen- und Firmenschilder, Wegweiser, Abweisesteine für Kreuzwege und Straßen an Abhängen, Sicherheitsbojen für Hafeneingänge und versteckte Klippen, Schwimmgürtel zum Gebrauche bei Schiffbrüchen; ja, ein Taucher in Leuchtfarbenkleidung kann in der größten Wassertiefe durch sein eigenes Licht die kleinsten Einzelheiten erkennen. Die älteren Phosphore werden durch die Einflüsse von Luft und Wetter verdorben und sind deßhalb in völlig geschlossenen Glasröhren aufbewahrt; aber die Balmain'schen und Gädicke'schen Lichtsauger sollen durch die Atmosphärilien nicht angegriffen werden; wie lange diese Unverletzbarkeit dauert, ist noch unbekannt. Die Phosphorescenz wird am Besten erregt durch das directe Sonnenlicht, dann durch das elektrische und Magnesiumlicht; die neuen Phosphore leuchten indeß auch durch trübes Tages- und Lampenlicht, ja selbst durch die Flamme eines Zündhölzchens, wenn dieselbe nur nahe genug gebracht wird. Welche Farben das Phosphorescenzlicht enthält, dasselbe erregen und welche es auslöschen (s. 330.). Durch Chlor, Salpeter- und Salzsäure wird der Leuchtstein zerstört, durch Schwefelsäure, beigemischtes Blei oder Eisen stark geschwächt. — Während das Leuchten von Thieren, Pflanzen, sich zersetzenden organischen Körpern in letzter Zeit befriedigend erklärt wurde, ist trotz, ja wegen des Reichthums der neuen Leuchtsteinphänomene die Insolation räthselhafter geworden. Früher konnte man dieselbe dem Mittönen analog erklären: einzelne Mol. der Phosphore sind auf gewisse Schwzn. abgestimmt, weil sie durch die Anz. der Nachbarmol., wie von einer Art Coercitivkraft (Emsmann 1857), festgehalten sind. Wenn sie daher von gleich hohen Aetherschw. getroffen werden, so müssen sie nach und nach diese Schw. annehmen und nachher dem Aether wieder mittheilen. Aber durch die Spectral-Analyse ist festgestellt (330.), daß die Schwzn. des Phosphorescenzlichtes meist von denen des erregenden Lichtes verschieden sind, was gegen das erste Gesetz des Mittönens verstößt. Während die alten Phosphore längerer Belichtung durch das weiße Sonnenlicht bedurften und nur wenig nachleuchteten, bedürfen die neuen nur einer momentanen Beleuchtung durch irgend eine Lichtquelle und leuchten dann eine ganze lange Winternacht hindurch, was auch dem Mittönen wenig entspricht; endlich stimmt diese Erklärung nicht mit dem Einfluß der Wärme (s. ad 3). Um der Lösung des Räthsels näher zu kommen, ist daher jede allgemeine Kenntniß von Interesse. Dahin gehören aus älterer Zeit die Forschungen von Becquerel (Vater und Sohn, 1840—66), welche durch die Anwendung des eigens construirten *Phosphoroskops* ergaben, daß alle Körper phosphoresciren können, von 35 St. bis 0,0001 Sec. herab, am wenigsten Flüssigkeiten und Gase. In neuerer Zeit (1881) hat L. Darwin die Abnahme der Lichtstärke untersucht und gefunden, daß dieselbe unabhängig von der Stärke der Belichtung ist, aber von der Zeit nach folgender Fl. abhängt: $l^c = a/(t + b)$, worin l die Lichtstärke, t die Zeit, a, b und c drei constante Größen bedeuten, und woraus sich ergibt, daß die Geschw. der Abnahme schwankt wie die Potenz 1,86 des Lichtes; ähnliches hatte schon Becquerel gefunden. Solche Untersuchungen mögen vielleicht zur Lösung des Räthsels führen. Gädicke und Dreher (1881) nehmen an, daß die Schw. des erregenden Lichtes die Atome der Leuchtsteinmoleküle bis zur Grenze der Elasticitätssphäre auseinander treiben, dadurch ein Quantum

von potentieller Energie in den Atomen ablagern, welches nach der Belichtung als kinetische Energie in den Schw. der Atome wieder entwickelt werde, da dieselben durch ihre Anziehung aus der äußersten Grenze der Elasticitätssphäre nach und nach in ihre Gleichgewichtslage zurückkehren müßten.

Ad 3. Wenn man einen bestrahlten und darum leuchtenden künstlichen Phosphor erwärmt, so wird seine Phosphorescenz bedeutend im Lichte verstärkt, aber in der Dauer verkürzt, während doch eine Zunahme beider erwartet werden sollte. Auch die natürlichen Phosphore leuchten beim Erwärmen stärker, wodurch manche Annahme von Phosphorescenz durch Wärme allein herrühren mag; so steht in den Lehrbüchern der Mineralogie: Flußspath wird durch Wärme phosphorescirend. Auch das Papier phosphorescirt erst bei einer Wärme, die der Entzündungstemperatur nahe kommt. Wie nun die Phosphorescenz durch Verstärken der Schwingungen mittels der Wärme erregt wird, so gibt es auch dem Phosphorleuchten ähnliche, durch Oxydation erzeugte Lichtphänomene durch Wärme. Schon Davy hatte beobachtet, daß ein heißer spiraliger Platindraht in einem Gemisch von Aetherdampf und Luft glühend wird und beim Erlöschen eine schwache phosphorescirende Flamme zeigt; als Joubert (1874) das Phosphorleuchten als eine langsame Oxydation des Phosphordampfes erklärte, fügte er hinzu, daß auch geschmolzener Schwefel und Arsen durch Verdampfen phosphorescirende Flammen bilden. Beide Erscheinungen wurden neuerdings näher erforscht; Aether bildet über 260° eine blaue Phosphorescenzflamme von so niedriger Temp., daß man den Finger in dieselbe halten kann, daß sie Papier nur bräunt und Schwefelkohlenstoff nicht entzündet; ganz analog ist die entwickelte Kohlensäuremenge gering; viele andere org. Flüssigkeiten verhalten sich ähnlich (Perkin 1882). Wenn man Schwefel im Dunkeln auf einer Platte erhitzt, zeigt sich plötzlich ein helles Phosphoresciren der aufsteigenden Schwefeldämpfe, das wie eine große grauweiße Flamme aussieht; auch diese Flamme hat die an denselben Zeichen erkennbare niedrige Temp., wie die des Aethers. Sie zeigt sich auch, wenn man einen erhitzten Glasstab in Schwefel taucht, dann herauszieht und die gewöhnliche blaue Schwefelflamme ausbläst (K. Heumann 1884).

Am Schlusse dieses § stand in den früheren Auflagen: Aus schwacher Phosphorescenz wird wohl auch Reichenbachs Odlicht bestehen. Vor mehr als 40 Jahren nämlich veröffentlichte Reichenbach seine „Odisch-magnetische Briefe" und a. d. Schriften, in denen er u. A. behauptete, daß sensitive, d. i. zu Somnambülismus, magnetischem Schlaf, Starrkrampf u. s. w. geneigte, wie man jetzt sagt, hypnotische Personen über den Polen eines Magnetes Phosphorescenzlicht sähen; er verwickelte sich hierdurch in Streitigkeiten, die dem verdienstvollen Forscher das Leben verbitterten. Seitdem blieb die Sache streitig. Von der Dubliner phys. Ges. wurde nun eine Commission ernannt, Namens derer W. F. Barrett (1883) berichtete, daß sie 2 Personen gefunden hätten, die jedesmal beim unvermerkten Schließen und Oeffnen eines Stromes über den Polen eines starken Elektromagnetes eine Lichterscheinung entstehen, resp. verschwinden sahen.

3. Die Fortpflanzung des Lichtes.

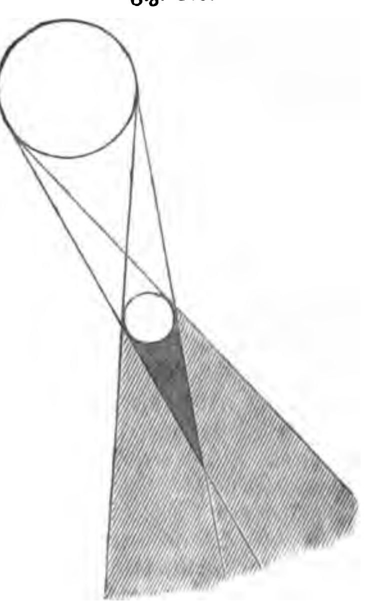
282 **Die Lichtstrahlen.** Unter Lichtstrahlen versteht man die Linien, in welchen sich das Licht fortpflanzt. Das Licht pflanzt sich sowohl durch den Weltraum, wie auch durch Körper fort, weil der Aether überall verbreitet ist; die Körper, welche das Licht durchlassen, werden je nach der Menge des durchgehenden Lichtes durchsichtig, halbdurchsichtig, durchscheinend genannt; undurchsichtig heißen diejenigen, die kein Licht durchlassen. — *Die Lichtstrahlen gehen von einem leuchtenden Punkte nach allen Richtungen; die Lichtstrahlen sind in einem isotropen Medium gerade Linien.*

Der Beweis für diese zwei Sätze liegt darin, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, und daß für eine Wellenbewegung in einem isotropen Medium diese zwei Sätze gelten (229.). Der Nachweis des ersten Satzes ist damit zu führen, daß ein leuchtender Punkt von allen Seiten sichtbar ist, der des zweiten Satzes durch die bekannte Thatsache, daß ein Lichtpunkt verschwindet, wenn in die gerade Linie zwischen dem Auge und dem Punkte ein undurchsichtiger Körper gebracht wird.

283 *Folgen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes.* 1. Der Schatten ist die Gegend an einem undurchsichtigen Körper, die kein Licht empfängt. Man unterscheidet Eigenschatten und Schattenraum; der Eigenschatten ist derjenige Theil des undurchsichtigen Körpers selbst, der nicht beleuchtet ist; der Schattenraum ist der Raum hinter dem Körper, in den kein oder auch weniger Licht dringt, als in den übrigen Raum rings um den Körper. — Wenn die Lichtquelle ein Punkt ist, so ist der Schattenraum ein abgestumpfter

egel oder eine abgestumpfte Pyramide, deren kleine Basis die Körpergrenze ist, deren an-
eres Ende sich aber allmälig verliert; ist die Lichtquelle von dem Körper sehr weit entfernt,
ie die Sonne von den irdischen Körpern, so ist der Schattenraum prismatisch oder cylin-
risch, und zwar mit einer Grundfläche, die durch die Körpergrenze bestimmt ist. Der auf
ine Fläche fallende Schatten oder **Schlagschatten** ist der Durchschnitt derselben mit dem
Schattencylinder oder Schattenkegel. — Ist die Lichtquelle kein Punkt, so unterscheidet man
ernschatten und Halbschatten; der **Kernschatten** ist der Raum, der von keinem Theile
es leuchtenden Körpers Licht erhält, der **Halbschatten** dagegen der Raum, der nur von
inem Theile der Lichtquelle erleuchtet wird; die Form des Kernschattens ist bedingt durch
ie Form und Größe der Lichtquelle und des Körpers. Sind z. B. beide kugelförmig, und
ß die Lichtquelle größer als der Körper, wie bei der Sonne und ihren Planeten und Tra-
anten, so hat der Kernschatten die Form eines Kegels, dessen Oberflächen-Verlängerung
ie beiden Körper berührt (Fig. 173); der Halbschatten ist ein abgestumpfter Kegel, dessen
Seitenlinien beide Körper berühren, dessen kleinere
Basis der Schattenkörper ist, und der sich nach der
Richtung der größeren Basis hin allmälig verliert.
Da der Schnitt eines Kegels senkrecht zu seiner
Achse kreisförmig ist, so bildet der Schlagschatten,
wenn er auf eine solche senkrechte Fläche fällt, einen
nach außen immer heller werdenden, halbdunkeln
kreis, der einen ganz dunkeln Kreis einschließt,
wenn auch der Kernschatten noch auf die Fläche
fällt. Nach den Lehren der Geometrie sind die Di-
mensionen der Schatten leicht zu berechnen. Eine
besonders wichtige Anwendung finden die Sätze
über Schatten bei den Sonnen- und Mondfinster-
nissen, s. 578. Bei einer Mondfinsterniß tritt der
Vollmond in den sehr mächtigen Schatten der Erde,
und bei einer Sonnenfinsterniß versperrt uns der
Neumond den Anblick der Sonne und wirft seinen
Schatten auf die Erde; diejenigen Punkte der Erde,
über welche der Kernschatten des Mondes hingeht,
haben totale Sonnenfinsterniß; dagegen die Erd-
punkte, welche nur von dem Halbschatten des Mon-
des getroffen werden, partiale Sonnenfinsterniß;
eine ringförmige Sonnenfinsterniß wird an den
Erdpunkten gesehen, welche in die Verlängerung
des Kernschattens des Mondes fallen.

Fig. 173.



2. **Die optische Kammer** (Leonardo da Vinci 1500). **Dringen durch eine Wandöffnung in einen dunkeln Raum Lichtstrahlen, so entstehen auf der gegenüberliegenden Wand umgekehrte Bilder der Gegenstände, von denen die Lichtstrahlen kommen.** Von jedem Punkte dieser Gegenstände gehen nämlich, wenn dieselben ichtbar, also beleuchtet sind, Lichtstr. nach allen Richtungen, also auch durch die Oeffnung;
von einem physischen Punkte geht ein ganzes Strahlenbündel aus, das sehr zahlreiche Str.
nthält, wenn der Punkt hell ist, dagegen nur wenige Str., wenn er schwach beleuchtet ist;
ß der physische Punkt dunkel, so enthält das in Gedanken durch die Oeffnung gezogene
Strahlenbündel gar keine Str. Nun ist aber die Lage der Geraden, die durch einen Punkt
ehen, nach dem Schnitte gerade die umgekehrte als vorher; folglich müssen in dem dunkeln
Raume die durch die Oeffnung eingedrungenen Strahlenbündel die entgegengesetzte Lage
aben als außerhalb. Das reiche Strahlenbündel erzeugt auf der gegenüberliegenden Wand
ine helle Stelle, das arme eine schwach beleuchtete Stelle, das gedachte dunkle läßt die be-
reffende Wandstelle dunkel; folglich entsteht auf der Wand genau derselbe Wechsel zwischen
ell, halbhell und dunkel, wie auf den Gegenständen selbst, nur in umgekehrter Lage; es
ntsteht ein verkehrtes Bild. Das Bild ist um so größer, je kleiner die Entf. der Gegen-
ände und je größer die Entf. der Bildfläche von der Oeffnung ist; es ist um so deutlicher,
e kleiner die Oeffnung ist; aber in gleichem Maße nimmt dann auch die Helligkeit ab, wo-
urch die Deutlichkeit wieder vermindert wird. Eine zu große Oeffnung verwischt das Bild
öllig, weil eine solche als aus vielen kleinen zusammengesetzt angesehen werden kann, wo-
urch an jeder Stelle der Bildfläche mehrere Bilder verschiedener Stellen entstehen, die sich
gegenseitig verwischen. Eine ganze Fensteröffnung erzeugt daher kein Bild auf der gegenüber-
iegenden Zimmerwand, sondern nur einen allgemeinen Eindruck der größeren oder geringe-

ren Helligkeit der äußeren Dinge. Dagegen feine Löcher in geschlossenen Fensterläden oder die feinen Oeffnungen zwischen den Blättern einer Laube geben kreisförmige oder elliptische Sonnenbilder, wenn sie selbst auch die verschiedenste Gestalt besitzen; bei einer partialen Sonnenfinsterniß entstehen sichelförmige Sonnenbilder. Hat man eine mit mattem Glase verschlossene Pappröhre, die in einer zweiten, eine kleine Oeffnung im Boden besitzenden Röhre verschiebbar ist, so sieht man in derselben auf der Glastafel Bilder der Gegenstände; sie ist also eine optische Kammer im Kleinen.

3. **Die Perspective.** Denkt man sich von den einzelnen Eckpunkten eines Gegenstandes Geraden ins Auge gezogen und die einzelnen Punkte, in welchen diese Geraden eine verticale zwischen dem Auge und dem Gegenstande aufgestellte Bildebene treffen, durch solche Linien verbunden, wie sie an den Körpern selbst vorhanden sind, und denkt man sich die einzelnen Figuren, die auf der Bildebene dadurch entstehen, in gleicher Weise wie auf dem Gegenstande mit Licht, Schatten und Farben versehen, so muß das entstehende Bild im Auge denselben Eindruck hervorbringen wie der Gegenstand. Man nennt es die Perspective oder das perspectivische Bild des Gegenstandes. Die Lehre von der Perspective ist die Grundlage der Zeichenkunst und Malerei.

4. **Das Fixiren von geraden Linien in der Meßkunst.** Um von einem Punkte auf dem Felde aus eine gerade Linie abzustecken, stellt man einen Stab an dem Punkte auf und läßt nun andere Stäbe so stellen, daß sie von dem ersten Stabe für das Auge gedeckt erscheinen; genauer verfährt man mit dem Diopterlineal oder mit dem Fernrohre mit Fadenkreuz. Das erste besteht aus einem wagrechten Lineal, das an beiden Enden senkrechte Arme trägt; der eine Arm enthält einen verticalen Spalt, der andere eine große Oeffnung mit einem verticalen Pferdehaare. Das Auge befindet sich in gerader Linie mit dem Haare und einem Gegenstande, wenn diese sich decken. Das Fadenkreuz in einem Fernrohre besteht aus einem wagrechten und einem lothrechten Spinnenfaden, die sich in der Achse des Rohres kreuzen; die Gerade ist fixirt, wenn Fadenkreuz und Gegenstand sich decken.

284 **Die Intensität des Lichtes.** Die Stärke der Lichtwirkung einer Lichtquelle oder die Intensität des Lichtes an irgend einer Stelle hängt ab: 1. Von der Entstehungsstärke des Lichtes; sie ist derselben direct proportional. 2. Von der Entfernung von der Lichtquelle; die Intensität des Lichtes ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. 3. Von dem Medium, durch welches sich das Licht fortgepflanzt hat; die Intensität ist um so geringer, je stärker die Absorption des Mediums ist. 4. Von dem Winkel, unter dem die Lichtstrahlen die leuchtende Fläche verlassen; die Beleuchtung ist proportional dem Cosinus des Ausgangswinkels. — Fällt das Licht auf eine Fläche, so ist die Stärke der Erleuchtung auch noch abhängig: 5. Von dem Winkel, den der Lichtstrahl mit der Fläche bildet; die Stärke der Erleuchtung ist proportional dem Sinus des Neigungswinkels der Lichtstrahlen gegen die Fläche. 6. Von der Reflexionsfähigkeit dieser Fläche; reflectirt die Fläche nicht, so ist sie nicht erleuchtet; reflectirt sie alles auffallende Licht, so ist sie stark erleuchtet; reflectirt sie nur einen Theil oder nur einige Farbenbestandtheile des Lichtes, so ist sie schwächer erleuchtet.

1. Die Stärke einer Lichtquelle hängt von der Natur derselben und von der Höhe der Gluth ab, zu welcher der glühende Körper oder die in einer Flamme glühenden Theilchen gebracht werden; denn mit der steigenden Temperatur wächst nicht blos die Amplitude, sondern auch die Schwz. der Moleküle; am stärksten ist das Licht bei der Weißgluth. Doch ist die Lichtwirkung der Schwz. durchaus nicht proportional; denn das Maximum der Lichtwirkung wird nicht von den violetten, sondern von den gelben Strahlen hervorgebracht; diese müssen also entweder die größte Amplitude haben, oder das Auge muß für dieselben am empfindlichsten sein. — 2. Daß die Intensität des Lichtes im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entf. steht, folgt aus dem Wesen des Lichtes als einer Wellenbewegung, für welche der Satz allgemein in 229. bewiesen wurde. Doch ist er auch leicht geometrisch zu beweisen: denkt man sich die Spitze einer Pyramide als Lichtquelle und das Licht im Inneren der Pyramide fortschreitend, so trifft es nach einem Lehrsatze der Geometrie in doppelter Entf. auf eine 4mal so große, in 3facher Entf. auf eine 9mal so große, ... in $n$facher Entf. auf eine n^2mal so große Fläche; folglich empfängt das gleiche Flächenstück eine n^2mal kleinere Lichtmenge. — Nachweisen kann man diesen wichtigen Satz mit irgend einem, z. B. Ritchies Photometer (1825); dasselbe besteht aus einem geschwärzten Kasten, in dessen Mitte zwei ganz gleiche Spiegel unter Winkeln von 45° gegen den Horizont an einander gelehnt sind; über denselben ist der Kasten durchbrochen und ein dunkles Rohr aufgesetzt, durch welches man auf die Spiegel sehen kann. Stellt man nun in irgend einer Entf.

on dem einen offenen Ende ein Wachslicht auf, so muß man in doppelter Entf. von dem nderen offenen Ende 4 gleiche Lichter aufstellen, damit die 2 Spiegel gleich stark beleuchtet ind. — 3. Die Absorption des Lichtes, d. i. die Aufzehrung des Lichtes durch das Meium, wird später betrachtet. — 4. Der Beweis des Satzes ist leicht an Fig. 174 zu führen. ine kugelförmige Lichtquelle erscheint ns als gleichmäßig beleuchtete Scheibe, o empfängt das Auge gleiche Lichtündel, $\alpha\beta ab$, $\gamma\delta cd$ u. s. w. Nun eten aber aus cd mehr Lichtstrahlen ls aus ab, und zwar in dem Verältnisse mehr als cd größer ist als b, d. i. in dem Verhältnisse $cd : ce = 1 : \cos\alpha$; folglich müssen bei dem hiefen Austritte die Strahlen in dem erhältnisse $\cos\alpha : 1$ geschwächt weren, die Beleuchtungsstärke ist also proortional zu $\cos\alpha$, d. i. zu dem Coinus des Ausgangswinkels. — 5. Läßt man ein Lichtbündel, dessen Dicke gleich der Kathete ines rechtwinkligen Dreiecks ist, senkrecht auf diese fallen und dann weiter gehen, so trifft asselbe die ganze Hypotenuse und vertheilt sich auf diese größere Linie; daher empfangen leiche Stücke der Hypotenuse weniger Licht als gleiche Stücke der Kathete, und zwar in em Verhältnisse weniger, als die Kathete kleiner ist wie die Hypotenuse; dieses Verhältniß t aber durch den Sinus des Gegenwinkels der Kathete, d. i. des Neigungswinkels der trahlen gegen die Hypotenuse ausgedrückt; die Erleuchtungsstärke ist also dem Sinus des leigungswinkels proportional. Auch dieser Satz läßt sich mit Ritchies Photometer nacheisen, wenn die Spiegel verstellbar sind. Dreht man eine weiße Fläche gegen ein Lampenicht in verschiedene Neigungen, so sieht man leicht die Ab- und Zunahme der Erleuchtung. — 6. Die Verhältnisse der Reflexion werden später beträchtet werden.

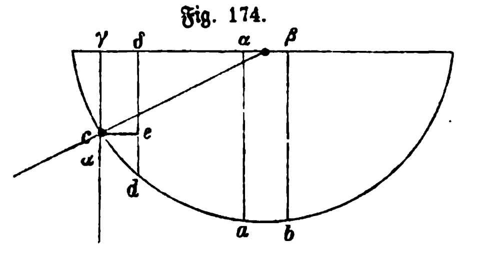


Fig. 174.

Die Photometrie. Die Photometer ($\varphi\tilde{\omega}\varsigma$, Licht) sind Apparate zur vergleichenen Messung der Lichtstärke. Sie gründen sich meist auf den Satz von dem umekehrten Verhältnisse der Intensität einer Lichtquelle zu dem Quadrat der Enternung. Die hauptsächlichsten sind: 1. Das **Schattenphotometer** von Lambert 1760); 2. das **Spiegelphotometer** von Ritchie (s. 284.); 3. das **Fettfleckphotometer** von Bunsen (1857). Bei den gewöhnlichen photometrischen Unteruchungen von Flammen wird die Leuchtkraft einer 6pfündigen Wachskerze (6 auf in Pfd.) als **Lichteinheit** zu Grunde gelegt, in Frankreich der bec Carcel gleich Normalkerzen. Die zu untersuchende Flamme wird in eine solche Entfernung on dem Photometer gebracht, daß sie auf dasselbe genau denselben Eindruck macht ie die Normalkerze; die Lichtstärke der betreffenden Flamme verhält sich dann zu erjenigen der Normalkerze direct wie die Quadrate der Entfernungen; denn wäre ie Lichtquelle ebenso stark wie die Normalkerze, so würde sie in n facher Entferung n^2mal schwächer leuchten als diese; leuchtet sie aber in dieser Entfernung benso stark, so muß ihre Intensität n^2mal größer sein.

285

Da die angeführten Lichteinheiten unbestimmt und wechselnd sind, so hat der Congreß er Elektriker (Paris 1884) beschlossen, daß als **absolute Lichteinheit** diejenige Lichtenge gelten solle, die 1 qcm Platin bei seiner Erstarrungstemp. ausstrahlt. Violle hatte ämlich vorher festgestellt, daß während der Erstarrung die Strahlung dieselbe bleibt und aß die absolute Lichteinheit = 2,08 bec Carcel ist.

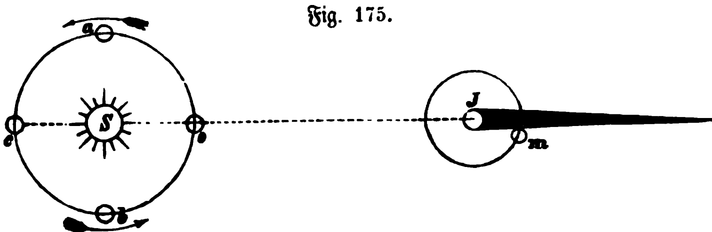
Das Lambert'sche Photometer besteht aus einem vor einer Tafel stehenden Stabe, der uf die Tafel Schatten der zu vergleichenden Lichtquellen wirft; der Schatten vom stärkeren ichte wird nur durch das schwächere Licht beleuchtet und der Schatten vom schwächeren Lichte urch das stärkere; folglich wird der erste Schatten dunkler sein als der letzte. Rückt man ber die stärkere Lichtquelle weiter von der Tafel weg und zwar so lange, bis die beiden chatten gleich stark sind, so sind auch die Wirkungen der beiden Lichtquellen gleich. — unsens Photometer besteht aus einer Papiertafel, die einen Fettfleck enthält. Der Fettek läßt mehr Licht durch als das reine Papier; folglich muß auf der Seite der größeren ichtstärke der Fleck dunkler als das Papier, auf der Seite der kleineren Lichtstärke aber heller ls das Papier erscheinen. Wenn dagegen beiderseits die Lichtstärke gleich groß ist, so kommt on der zweiten Seite gerade soviel Licht durch den Fleck auf die erste, als von der ersten ach der zweiten hinübergegangen ist; folglich wird der Lichtverlust des Flecks ersetzt; der

Fleck erscheint so hell wie das Papier. Um also mittels Bunsens Photometer eine Flamme mit der Normalkerze zu vergleichen, rückt man sie, während die Normalkerze auf der einen Seite brennt, auf der anderen Seite so lange hin und her, bis der Fleck von dem Papier nicht mehr zu unterscheiden ist; die Lichtstärken verhalten sich dann wie die Quadrate der Entfernungen. Bohn (1859) hob hervor, daß nicht bloß die Reflexion und Durchlassung, sondern auch die Absorption in Fleck und Papier verschieden seien und daß hierdurch der Fleck bei links und rechts gleicher Beleuchtung hell auf dunkelm Grunde erscheine. Rüdorff behauptete (1874) das Gegentheil, gab jedoch eine Methode richtigen Gebrauches. H. Krüß bewies (1880) mathematisch und experimentell die Richtigkeit von Rüdorffs Angaben und des allgemeineren Satzes: die wahre Lichtstärke ist gleich dem geometr. Mittel der Intensitäten, die beim Verschwinden des Flecks links und rechts sich ergeben. Nach Töpler (1879) ist die Absorption nur bei dickerem Papier störend, während bei dünnem das Verschwinden des Flecks mit der Stellung des Beobachters veränderlich ist; er verwirft daher den Fleck und empfiehlt dafür folgenden Schirm: derselbe besteht aus zwei dünnen durchscheinenden Scheiben von Pergamentpapier, die zwischen sich eine Scheibe gewöhnlichen Schreibpapiers fassen, das in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung von 20 bis 25mm Durchmesser hat; da die Schirmstelle an dieser Oeffnung durchscheinend ist, während der übrige Theil des Schirmes undurchsichtig bleibt, so vertritt jene die Stelle des Bunsen'schen Fettflecks.

286 **Die Geschwindigkeit des Lichtes.** Da die Geschw. einer Wellenbewegung nach Fl. (29) $c = \sqrt{(e : d)}$ nur von der Elasticität und Dichte des Mediums abhängt, nicht aber von der Zahl und Weite der Schwingungen, so ist auch die Geschw. des Lichtes unabhängig von der Farbe und von der Intensität des Lichtes, wie überhaupt von der Beschaffenheit der Lichtquelle, was durch Versuche bestätigt wird. Berechnen läßt sich die Geschw. aus Fl. (29) nicht, weil die Elasticität und Dichte des Aethers unbekannt sind. Man hat daher die Geschw. des Lichtes durch Beobachtungen und Versuche aufzufinden gesucht und im Mittel zu 40000 M. oder 299000km bestimmt. Die Methoden waren folgende: 1. Durch die Verfinsterung der Jupitertrabanten, von Olaf Römer 1676. 2. Durch die Aberration des Fixsternlichtes, von Bradley 1727. 3. Die Methode mit zwei Fernrohren und einem Zahnrade, von Fizeau 1849. 4. Die Methode mit stehen Spiegeln und einem Mikroskop, von Foucault 1862.

1. Der erste Jupitertrabant m (Fig. 175) tritt bei jedem Umlaufe einmal in den Schatten des Jupiter J, weil der Trabant dem Planeten nahe und dessen Schatten sehr

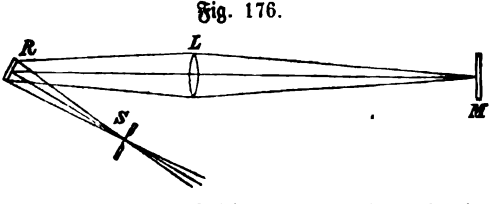
Fig. 175.



dick ist; es findet also in jeder Umlaufzeit (42½ St.) eine Verfinsterung des Mondes m und ein Wiederaustritt desselben aus dem Schatten statt. Dieser Austritt findet regelmäßig nach 42½ St. statt, wenn die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne S sich in solchen Stellen o oder c befindet, wo sie sich in der genannten Zeit dem Jupiter nicht nähert und sich auch nicht von ihm entfernt. Befindet sie sich aber in a, so entfernt sie sich in 42½ St. um 600000 M. vom Jupiter; dann geschehen die Austritte aus dem Schatten 15 Sec. später als in o und c; Römer schloß hieraus, daß das Licht 15 Secunden brauche, um der Erde auf jener Strecke nachzufolgen; ebenso finden in b, wo die Erde sich dem Jupiter nähert, die Austritte 15 Secunden früher statt, weil die Erde dem Licht um jene Strecke entgegen eilt; demnach legt das Licht in 15 Sec. 600000 M., also in 1 Sec. 40000 M. zurück. — 2. Während das Licht von der Vorderwand des Auges zur Hinterwand oder Netzhaut fortschreitet, bleibt das Auge nicht in Ruhe, sondern bewegt sich mit der Erde um einen allerdings sehr kleinen Bruchtheil von 4 M. fort; demnach trifft das Licht die Netzhaut nicht in der Richtung des äußeren Strahles, sondern an einer Stelle nach der Seite hin, von welcher die Erde herkommt. Da wir nun einen Gegenstand in der Richtung sehen, in welcher sein Strahl die Netzhaut trifft, so sehen wir die Fixsterne nicht an ihrer wahren Stelle,

sondern je nach der Richtung der Erde in ihrer Bahn verschoben, was man die Aberration des Fixsternlichtes nennt; die Fixsterne beschreiben in Folge dessen eine jährliche kleine Ellipse, deren halbe große Achse 20'' beträgt und welche als Abbild der Erdbahn anzusehen ist. Das Bogenmaß dieser Halbachse stimmt mit dem Winkel überein, den die verlängerte äußere Strahlenrichtung mit dem Lichtweg durch das Auge macht; diese zwei Linien und der Winkel bilden ein rechtwinkeliges Dreieck, dessen Gegenkathete der Weg des Auges oder der Erde in derselben Zeit ist, in welcher das Licht die Hypotenuse durchlaufen hat; die Gegenkathete und die Hypotenuse verhalten sich also wie die Geschw. c der Erde zu der Geschw. v des Lichtes, und dieses Verhältniß c : v ist der Sinus des gegenüberliegenden Winkels von 20''; also ist $c : v = \sin 20''$, woraus $v = c / \sin 20'' = 4 / 0{,}0001 = 40000$ M. — 3. Fizeau ließ durch einen schief in einem Fernrohre befestigten Spiegel ein seitlich hereinkommendes Lichtbündel in die Achse des Fernrohres reflectiren, wo dasselbe durch die Lücke eines Zahnrades hinausging und sich zu einem 8633^m entfernten Fernrohre fortpflanzte und, von einem Spiegel in demselben reflectirt, wieder durch die Zahnlücke zurückkehrte und in das am hinteren Ende des ersten Rohres befindliche Auge gelangte. Das Auge erblickte so den Lichtpunkt, von dem das Strahlenbündel ausging; dasselbe fand statt, wenn man das Rad langsam drehte, weil der Strahl eher zurück war, als ein Zahn an die Stelle der Lücke gelangte; drehte man aber das Rad nach und nach rascher und zwar so rasch, daß die Zeit eines Hin- und Herganges genau der Zeit gleich war, in welcher ein Zahn an die Stelle der vorausgehenden Lücke trat, so mußte der Lichtpunkt verschwinden. Dies geschah durch ein Rad mit 720 Zähnen und 720 Lücken bei 12,6 Umläufen in der Sec.; also war diese Zeit $= 1 / (1440 \,.\, 12{,}6) = {}^1/_{18144}$ Sec., während welcher Dauer das Licht $2 \,.\, 8633^m$ zurücklegte; daher ist die Geschw. des Lichtes $= 17\,266 \,.\, 18\,144^m = 42\,200$ Meilen. In ähnlicher Weise fand Fizeau die Geschw. in Wasser $= {}^3/_4$ von der Geschw. in der Luft. — 4. Foucault ließ Sonnenlicht von einem, mit Strichen von $0{,}1^{mm}$ Entf. versehenen, Silberspiegel reflectiren, ließ alsdann das Strahlenbündel über einen drehbaren ebenen und fünf Hohlspiegel durch Reflexion hin- und zurückgehen. War der drehbare Spiegel in Ruhe, so fiel das Bild der Silberstriche auf diese selbst; durch ein Mikroskop erschienen daher die Silberstriche unverändert in ihrer früheren Zahl und Lage. Wurde aber der drehbare Spiegel so schnell gedreht, daß er bei der Rückkehr des Strahlenbündels von den fünf Hohlspiegeln eine andere Richtung hatte als bei dem Hingange desselben, so mußte nothwendig das Bild der Silberstriche auf dem Silberspiegel an einer anderen Stelle als diese selbst erscheinen. Aus dem Abstande des Bildes von den Strichen selbst, sowie aus der Größe der Drehung des drehbaren Spiegels findet man die Zeit für den Hin- und Rückweg des Lichtes über die 5 Hohlspiegel, dessen Länge leicht durch den Abstand der Spiegel gegeben ist. Foucault fand hieraus die Geschw. des Lichtes $= 40\,145$ M., also kleiner als $42\,000$ M., wie man früher nach allen 3 obigen Methoden gefunden hatte. Früher nahm man nämlich die Entf. der Erde von der Sonne zu 21 M. M an; in der ersten Methode mußte daher an Stelle von 40 M. M. 42 stehen und in der zweiten Methode 4,19 an der Stelle von 4 M.; daher ergaben auch jene Methoden für $v = 42\,000$ M. Eine ganze Reihe astronomischer Thatsachen (563.) hatte aber schon seit etwa 30 J. darauf hingewiesen, daß 21 M. M. nicht ganz richtig sei und 20 dafür gesetzt werden müsse; diese Hindeutungen wurden durch die Beobachtungen des Venusdurchganges vom 8. Dec. 1874 bestätigt und dadurch die Geschw. des Lichtes auf 40 000 M. festgestellt, womit auch das Resultat von Foucault stimmt, während das von Fizeau sich mehr der alten Zahl nähert. Nun hat aber Cornu seit längerer Zeit zahlreiche Beobachtungen angestellt nach der Methode von Fizeau, jedoch so vervollkommnet, daß derselbe einen Fehler von höchstens ${}^1/_{400}$ verbürgen zu können glaubt, und hat nach dieser Methode 40 000 M. gefunden. Ebenso hat Michelson (1878) in Annapolis die Foucault'sche Methode in vervollkommneter Weise mit dem in Fig. 176 skizzirten Apparate zu neuen Versuchen angewendet. Durch den Spalt des Schirmes S dringt ein Lichtstreif auf den drehbaren Planspiegel R, der das Licht auf eine Linse L mit 45^m Brennweite wirft, wodurch es auf den $[\ldots]00^m$ entfernten Planspiegel M senkrecht auffällt und daher auf demselben Wege zurückkehrt. Wenn der Drehspiegel R ruht, so fällt auf diese Weise das Bild des Spaltes auf ihn selbst; wurde er aber 256 mal per Sec. gedreht, so fiel das Spaltbild 133^{mm} von dem Spalt entfernt auf den Schirm. Hieraus konnte die Zeit berechnet werden, die das Licht für den bekannten Weg brauchte, und hieraus ergab sich die Geschw. $= 299\,944^{km} = 40\,000$ M.

Fig. 176.



Aufg. 458. Wenn die Schwz. der langsamsten violetten Strahlen 755 und die der schnellsten rothen Str. 452 Bill. beträgt, welches ist dann die Wellenlänge dieser Str.? Aufl.: 287

$393^{\mu\mu}$, $657^{\mu\mu}$, worin $\mu\mu$ (Mimi) ein Milliontel mm bedeutet. — A. 459. Wenn die Wellenlänge der dunkelsten Wärmestr. $4800^{\mu\mu}$ und die der äußersten ultravioletten Str. $300^{\mu\mu}$ wäre, welches wären dann die Schwzn. dieser Str. und wieviel Octaven würden die Aetherschw. enthalten? Aufl.: 62 Bill., 989 Bill., 4 Oct. — A. 460. Wie müßten sich die gelben Schw. von den rothen und von den violetten unterscheiden, wenn sie eine 2, resp. 3 mal größere Lichtstärke hätten als bezüglich jene beiden? Aufl.: Durch eine $\sqrt{2}$, bez. $\sqrt{3}$ mal größere Amplitude. — A. 461. Eine vergleichende Tabelle über das Wesen von Schall und Licht aufzustellen; einen Anhalt zur Lösung bietet 279. — A. 462. Die Lichtstärke von α Centauri mit der des Sirius zu vergleichen? Aufl.: Nach den in 280. angegebenen Zahlen $20000 : 16000 = 5 : 4$. — A. 463. Wenn die Venus im höchsten Glanze 623 Mill. mal schwächer als die Sonne leuchtet, wie verhält sie sich dann zum Jupiterglanze, der nach denselben (amerikanischen) Angaben 3028 Mill. mal schwächer als die Sonne ist? Aufl.: 5 : 1. — A. 464. Wie findet man den Schlagschatten eines Punktes, einer Linie, einer Fläche, eines Körpers auf einer Ebene, wenn die Lichtquelle ein naher Punkt, und wenn sie unendlich fern ist? Aufl. für den Punkt: Man zieht durch den Punkt einen Lichtstrahl und bestimmt den Punkt, wo dieser die Ebene schneidet; dieser Punkt ist der Schatten. — A. 465. Wie hoch ist ein Thurm, dessen Schatten 40^m lang ist, wenn ein daneben stehender Stab von 1^m Höhe einen Schatten von 60^{cm} Länge wirft? Aufl.: $66^2/_3{}^m$. — A. 466. Wie lang ist der Schatten eines 100^m hohen Thurmes, wenn die Sonne 45° über dem Horizont steht? Aufl.: $100 \tan 45° = 100^m$. — A. 467. Wie hoch ist ein Thurm, der bei einer Sonnenhöhe von 30° einen Schatten von 50^m Länge wirft? Aufl.: $28{,}87^m$. — A. 468. Wie lang ist der Schatten eines h^m hohen Thurmes am 21. März um Mittag in Mainz? Aufl.: $h \cot(90-50) = h \cot 40°$. — A. 469. Wie hoch ist ein Stab, der am 21. Juni in Mainz einen Mittagsschatten von der Länge s wirft? Aufl.: $s \cdot \tan 63^1/_2{}°$. — A. 470. Wie lang ist der Schattenkegel einer Kugel vom Radius r durch eine Sonne vom Radius R, wenn die Entf. der Mittelpunkte s beträgt? Aufl.: $rs / (R-r)$. — A. 471. Wie lang sind die Schattenkegel der Erde und des Mondes? Aufl.: ca. 182600, 50000 M. — A. 472. Wie groß ist der Halbmesser des Schattenkegels (A. 470) in der Entf. e? Aufl.: $r - e(R-r)/s$. — A. 473. Wie groß ist die Dicke des Erdschattens, wo der Mond durch denselben geht? Aufl.: 1238 M. — A. 474. Wie groß ist der Halbmesser des Halbschattens in A. 472? Aufl.: $[rs + e(R+r)] / \sqrt{[s^2 - (R+r)^2]}$. — A. 475. Wie groß erscheint ein Sonnenbild in der optischen Kammer auf einer 1^m entfernten Tafel durch eine Oeffnung von 1^{cm} Durchm.? Aufl.: Die Sonne erscheint uns unter einem Winkel von 32′; daher der Durchm. des Sonnenbildes $1 + 2 . 100 . \tan 16' = 1{,}93^{cm}$. — A. 476. Dieselbe Aufg. allgemein, wenn d der Durchm. der Oeffnung und s die Entf. der Tafel ist? Aufl.: $d' = d + 2s \tan 16'$. — A. 477. Wie groß muß die Entf. der Tafel sein, damit das Sonnenbild n mal so groß als die Oeffnung werde? Aufl.: $s = d/_2 (n-1) \cot 16'$. — A. 478. Wie mißt man auf dem Felde gerade Linien? Aufl.: Durch Meßketten oder Meßstäbe mit zwei Visirstangen; Erklärung. — A. 479. Wie errichtet man auf dem Felde Senkrechte? Aufl.: Durch 2 in rechtem Winkel sich kreuzende Diopter (Kreuzscheibe); Erklärung. — A. 480. Wenn die Stärke der Erleuchtung einer Flächeneinheit in der Entf. 1 durch 1 Normalkerze unter rechtem Winkel der Strahlen = 1 gesetzt wird, wie groß ist dann die Erleuchtung durch n Kerzen in der Entf. s und unter dem Winkel α? Aufl.: $i = n \sin \alpha / s^2$. — A. 481. Ueber einer Ebene findet sich in der Entf. s eine Normalkerze; wie stark wird ein um d vom Fußpunkte des Lothes entferntes Flächentheilchen f der Ebene beleuchtet? Aufl.: $fs / \sqrt{(s^2 + d^2)^3}$. — A. 482. Eine Stearinlampe, eine Argand'sche Oellampe und eine Uhrlampe mußten bez. 23^{cm}, 18^{cm}, 36^{cm} von der Bunsen'schen Scheibe entfernt sein, um wie eine Normalkerze in 8^{cm} Entf. zu wirken; welches waren die Lichtstärken? Aufl.: $8^{17}/_{64}$, $5^1/_{16}$, $20^1/_4$. — A. 483. Wieviel Zeit gebraucht das Licht, um vom Monde, von der Sonne, vom Neptun (620 M. M.) zu uns zu kommen? Aufl.: $1^1/_4$ Sec.; 8 Min. 20 Sec.; 4,2 St. — A. 484. Wie weit ist die Alkyone von uns entfernt, wenn das Licht 573 Jahre bis zu uns braucht? Aufl.: 723 Bill. M. — A. 485. Erscheinungen aus dem gewöhnlichen Leben, welche die verschiedene Geschw. von Licht und Schall zeigen? Aufl.: Entferntes Klopfen, Geschützblitz und Knall, Blitz und Donner u. s. w. — A. 486. Ein jüngst erschienenes Büchlein, „die Geschw. des [illegible] der Weltgeschichte" behauptet, daß man die historischen Ereignisse jetzt noch sehen könne; wie weit müßte man sich entfernen, um dem trojanischen Kriege (3000 Jahre) zuschauen zu können? Aufl.: $40000 . 60 . 60 . 24 . 365 . 3000 = 3784$ Bill. M. — A. 487. Was ist gegen diese Aufstellung einzuwenden? Absorption oder Extinction des Lichtes, allzu kleiner Gesichtswinkel, unmögliche Fernrohre. — A. 488. Wie müssen 2 Ebenen stehen, um gleiche Beleuchtung von der Sonne zu erhalten? Aufl.: Parallel neben einander, parallel hinter einander, oder so geneigt, daß eine Verbindungslinie der Sonne mit der Kante ihren Winkel halbirt; Erklärung.

4. Die Lehre von der Reflexion des Lichtes.

Die Katoptrik.

288 Wenn die Aetherwellen des Lichtes an der Oberfläche eines neuen Mediums anlangen, so können dieselben ein dreifaches Schicksal haben: 1. Sie können in das frühere Medium zurückkehren oder reflectirt werden; 2. sie können als Aetherwellen in das neue Medium eindringen und sich als solche in demselben und durch dasselbe fortpflanzen, sie werden durchgelassen; 3. sie können in dem neuen Medium als Aetherwellen vernichtet werden, weil sie ihre Bewegung an die Körpermoleküle abgeben und so, indem die Schwingungszahl sich erniedrigt, in dunkle Wärme verwandelt werden; man sagt dann, die Lichtstrahlen seien absorbirt worden. Häufig treten die drei Erscheinungen mit einander auf, meistens sind wenigstens zwei verbunden, selten oder nie wohl geschieht eine für sich. Indessen müssen dieselben getrennt dem Studium unterzogen werden. Wir betrachten zuerst die Reflexion und zwar die Reflexion an einem Flächen-Element, weil ein solches an jeder Oberfläche, sei sie glatt oder rauh, gerade oder krumm, als eben vorausgesetzt werden darf, und weil wir die Reflexion einer Wellenbewegung an einer ebenen Fläche schon (231.) kennen gelernt haben.

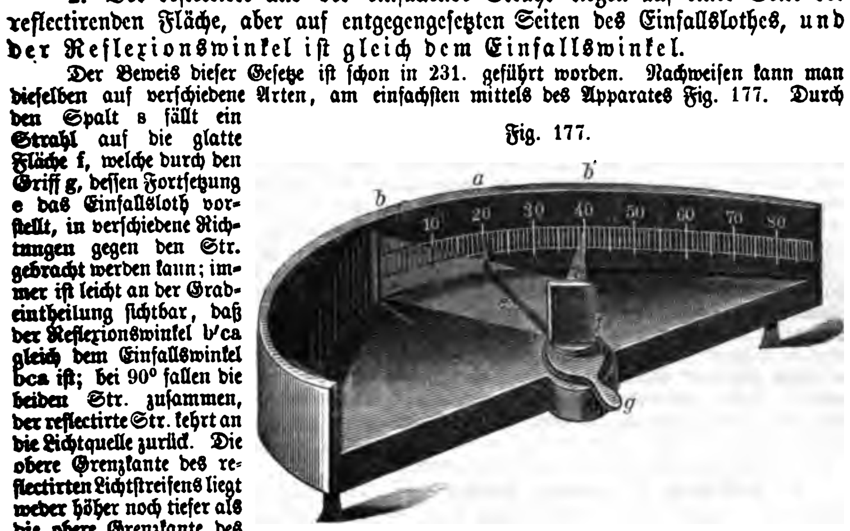
289 **1. Reflexion an einem Flächenelement.** Nach 231. gelten für diese Reflexion, weil das Licht eine Wellenbewegung ist, folgende Gesetze:

1. Der reflectirte Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der reflectirte und der einfallende Strahl liegen auf einer Seite der reflectirenden Fläche, aber auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes, und der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

Der Beweis dieser Gesetze ist schon in 231. geführt worden. Nachweisen kann man dieselben auf verschiedene Arten, am einfachsten mittels des Apparates Fig. 177. Durch den Spalt s fällt ein Strahl auf die glatte Fläche f, welche durch den Griff g, dessen Fortsetzung e das Einfallsloth vorstellt, in verschiedene Richtungen gegen den Str. gebracht werden kann; immer ist leicht an der Gradeintheilung sichtbar, daß der Reflexionswinkel b'ca gleich dem Einfallswinkel bca ist; bei 90° fallen die beiden Str. zusammen, der reflectirte Str. kehrt an die Lichtquelle zurück. Die obere Grenzkante des reflectirten Lichtstreifens liegt weder höher noch tiefer als die obere Grenzkante des einfallenden Streifens; hiermit ist auch das erste Gesetz nachgewiesen.

Fig. 177.

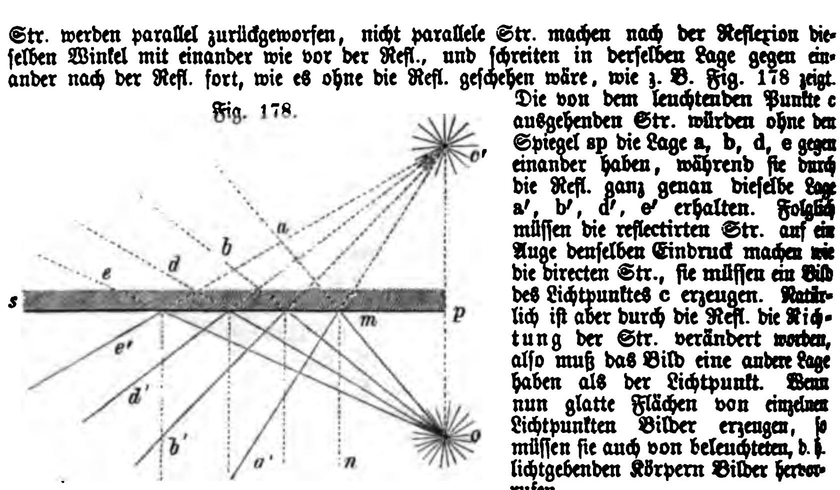


290 **2. Reflexion an einer glatten Fläche.** Glatte Flächen erzeugen Bilder. Dies geschieht nur unter der Voraussetzung, daß die Lichtstrahlen nicht größtentheils durch die glatte Fläche und den betreffenden Körper hindurchgehen, sondern in größerer Menge zurückgeworfen werden; dann sind die glatten Flächen Spiegel, sie erzeugen Bilder derjenigen Punkte, welche Licht auf dieselben werfen.

Beweis. Glatte Flächen sind solche Flächen, deren nahe beisammen liegenden Flächenelemente eine und dieselbe Richtung haben; daher haben die auf kleinere Flächentheile fallenden Strahlen nach der Reflexion dieselbe Lage gegen einander wie vor derselben; parallele

Str. werden parallel zurückgeworfen, nicht parallele Str. machen nach der Reflexion dieselben Winkel mit einander wie vor der Refl., und schreiten in derselben Lage gegen einander nach der Refl. fort, wie es ohne die Refl. geschehen wäre, wie z. B. Fig. 178 zeigt.

Fig. 178.



Die von dem leuchtenden Punkte c ausgehenden Str. würden ohne den Spiegel sp die Lage a, b, d, e gegen einander haben, während sie durch die Refl. ganz genau dieselbe Lage a', b', d', e' erhalten. Folglich müssen die reflectirten Str. auf ein Auge denselben Eindruck machen wie die directen Str., sie müssen ein Bild des Lichtpunktes c erzeugen. Natürlich ist aber durch die Refl. die *Richtung* der Str. verändert worden, also muß das Bild eine andere Lage haben als der Lichtpunkt. Wenn nun glatte Flächen von einzelnen Lichtpunkten Bilder erzeugen, so müssen sie auch von beleuchteten, d. h. lichtgebenden Körpern Bilder hervorrufen.

Ebene glatte Flächen erzeugen den Gegenständen gleiche Bilder; krumme glatte Flächen erzeugen ähnliche Bilder, d. i. nur vergrößerte oder verkleinerte Bilder, wenn die Krümmung nach allen Richtungen dieselbe ist; *krumme Flächen erzeugen Zerrbilder*, wenn sie eine nach verschiedenen Richtungen verschiedene oder unregelmäßige Krümmung besitzen.

Denn bei ebenen glatten Flächen haben auch weit von einander entfernte Flächenelemente dieselbe Richtung; folglich haben auch Str., die in größerer Entf. von einander die Fläche treffen, nach der Refl. noch dieselbe Lage gegen einander als vor derselben, es entsteht ein dem Gegenstande gleiches Bild. Bei krummen glatten Flächen aber haben weiter von einander entfernte Flächenelemente eine verschiedene Richtung; folglich müssen weiter von einander entfernte Str. nach der Refl. eine andere Lage gegen einander haben als vor derselben: das Bild muß anders aussehen als der Gegenstand. Ist die Krümmung nach allen Richtungen dieselbe, so wird auch das Bild nach allen Seiten in gleicher Weise verändert sein, es kann nur ein verkleinertes oder vergrößertes Bild entstehen; ist dagegen die Krümmung nach verschiedenen Richtungen verschieden, so wird die Veränderung nach der einen Richtung in anderer Weise geschehen als in anderen Richtungen, die Veränderung wird unregelmäßig sein, es werden Zerrbilder entstehen. — Nachweise für diese Sätze bietet das gewöhnliche Leben genug; in ebenen Spiegeln sieht man immer die Gegenstände in gleicher Gestalt und Größe; in Kugelspiegeln sieht man die Gegenstände kleiner oder größer, sonst aber ähnlich; eine Verzerrung tritt nur dann ein, wenn Theile eines Körpers dem Kugelspiegel viel näher sind als andere Theile, weil krumme Spiegel, wie sich später ergeben wird, verschieden entfernte Dinge in verschiedener Weise abspiegeln. Die Verzerrung, die ein Gesicht in einem kugeligen Gartenspiegel zeigt, wird um so stärker, je mehr man sich dem Spiegel nähert. Aechte Zerrbilder entstehen in Cylinder-, Kegel-, Pyramidalspiegeln. Man kann nach dem Reflexionsgesetze die Gestalt eines solchen Zerrbildes geometrisch construiren; umgekehrt lassen sich nach derselben Regel Zerrbilder herstellen, die in solchen Spiegeln zu richtigen Gestalten werden (Katoptrische Anamorphosen).

291 3. **Reflexion an rauhen Flächen.** *Rauhe Flächen erzeugen keine Bilder, sondern diffundiren das Licht*, zerstreuen dasselbe nach allen Richtungen und werden dadurch sichtbar. Spiegel dagegen werfen das Licht vorzugsweise nach einer oder nach wenigen Richtungen zurück, diffundiren aber nur wenig Licht und sind daher auch weniger sichtbar.

Rauhe Flächen haben in engster Nähe abwechselnde Erhabenheiten und Vertiefungen; daher sind ganz nahe beisammen liegende Flächenelemente von den verschiedensten, von allen nur denkbaren Richtungen; folglich müssen die Str., wenn sie auch parallel oder ganz enge an einander liegend auf eine rauhe Fläche fallen, nach den verschiedensten Richtungen zurückgeworfen, nach allen Richtungen ausgebreitet oder diffundirt werden. So diffundirt die Luft das Licht nach allen Richtungen, wodurch es auch an solchen Stellen hell wird, die nicht direct von der Sonne beschienen werden; so diffundiren die oberen Luftschichten das Licht,

das sie vor Sonnenaufgang oder nach Sonnenuntergang empfangen, in die unteren Luftgegenden und erzeugen dadurch die Morgen- und Abenddämmerung. Näheres hierüber in der Physik der Luft, 592.

Lage der Bilder bei ebenen Spiegeln. Das Bild eines Lichtpunktes in einem ebenen Spiegel liegt so weit hinter dem Spiegel als der Punkt vor demselben. 292

Die Richtigkeit dieses Satzes folgt schon aus dem 231. gefundenen Gesetze, daß der Mittelpunkt einer reflectirten Welle so weit hinter der reflectirenden Ebene liegt als der wellenerregende Punkt vor der Ebene. Doch läßt er sich auch direct beweisen. Da (Fig. 178) die refl. Str. a', b', d' und e' dieselbe Lage gegen den Spiegel haben, wie die directen Str. a, b, d und e, so müssen sie, rückwärts verlängert gedacht, sich in einem Punkte c' schneiden; dieser Punkt ist das Bild von c, weil die Str. a', b', d' und e' von ihm herzukommen scheinen. Die Lage dieses Punktes ergibt sich durch die Congruenz der Dreiecke cmp und c'mp; denn weil ∠ a'mn = cmn nach dem Hauptsatze, so ist sma' = pmc; und da sma' auch = pmc', so ist pmc' = pmc; außerdem sind die Dreiecke rechtwinkelig, weil der senkrechte Str. cp auch wieder senkrecht zurückgeworfen wird und ebenfalls von c' ausgehen muß. Aus der so erwiesenen Congruenz der beiden Dreiecke folgt, daß cp = c'p, womit der Satz bewiesen ist.

Ebenso wie jeder einzelne lichtgebende Punkt eines Gegenstandes sein Bild in gleichem Abstande hinter dem Spiegel hat, so auch der ganze Gegenstand. Da die Vorderfläche eines Gegenstandes dem Spiegel am nächsten ist, so muß auch von den Theilen des Bildes die Vorderfläche dem Spiegel am nächsten sein; die Vorderfläche und ihr Bild sind sich am nächsten gegenüber. In einem Spiegel erscheinen daher Vorder- und Hintertheil eines Gegenstandes verwechselt; Spiegelbilder in Wasser stehen auf dem Kopfe. Deßhalb scheinen im Spiegel auch die Seitenflächen verwechselt, rechts ist im Spiegel links und umgekehrt; das Spiegelbild von Gedrucktem und Geschriebenem ist unleserlich. — Aus dem Satze ergibt sich auch leicht, daß ein Planspiegel den Winkel halbirt, den ein vorwiegend nach der Länge ausgedehnter Körper mit seinem Spiegelbilde macht; hierauf beruht es, daß in Spiegeln von 45° Neigung ein wagrechter Gegenstand aufrecht steht und umgekehrt; es beruht hierauf die Anwendung von Spiegeln als Fensterspione, in Guckkasten u. s. w., so wie die zahlreiche Verwendung von Spiegeln mit 45° Neigung in physikalischen und anderen Apparaten, z. B. Ritchies Photometer, in Fizeaus Geschwindigkeitsapparat, in Newtons Spiegelteleskop u. s. w. — Weiter folgt aus dem Satze, daß ein Spiegelbild sich doppelt so rasch von seinem Gegenstande entfernt als der Spiegel, und daß es in einem gedrehten Spiegel den doppelten Drehwinkel des Spiegels beschreibt; auch diese Eigenschaft hat vielfache Verwendung, z. B. bei Foucaults Geschwindigkeitsapparat, bei Wheatstones Apparat zum Messen der Geschw. der Elektricität, beim transatlantischen Telegraphen, beim Spiegelsextant u. s. w. — Endlich ergibt der Satz noch, daß zwei parallele Spiegel unendlich viele Bilder eines zwischen ihnen stehenden Gegenstandes erzeugen, welche aber wegen der wiederholten Absorption immer schwächer werden, und daß zwei geneigte Spiegel einen Gegenstand so oft erscheinen lassen, als der Winkel derselben in 360° enthalten ist; hierauf beruht Brewsters Kaleidoskop ((1817) καλός = schön, εἶδος = Gestalt, σκοπέω = sehen) und das Debuskop (von Debus 1860), die beide zum Erfinden von Mustern geeignet sind.

Allgemeine Sätze über die Lage und Größe der Bilder bei sphärischen Spiegeln. Die Krummspiegel können kugelförmig oder nach der Ellipse, der Parabel oder jeder beliebigen anderen krummen Linie gekrümmt sein; wir betrachten vorwiegend die kugelförmig gekrümmten oder sphärischen Spiegel. Den **Mittelpunkt** c der Kugelkrümmung (Fig. 179) nennt man den geometrischen Mittelpunkt, den Mittelpunkt m der gewöhnlich kreisförmig begrenzten Spiegelfläche den optischen Mittelpunkt; die **Verbindungslinie** cm der beiden Mittelpunkte, die unbegrenzte Verlängerung des **Krümmungsradius** cm wird die optische **Achse**, und jeder Str. co, der durch den geometrischen Mittelpunkt geht, wird **Hauptstrahl** genannt. Die Hauptstr. sind von besonderer Wichtigkeit; denn sie bilden, da sie auf dem getroffenen Element der Kugelfläche senkrecht stehen, die Einfallslothe, und werden aus demselben Grunde in sich selbst reflectirt; daher liegt das 293

Fig. 179.

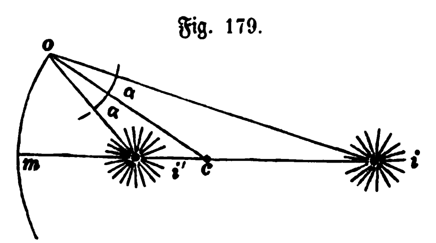


Bild jedes Punktes eines Hauptstr. auf demselben Hauptstr. Denn ein Bild entsteht an dem Punkte, in welchem sich die reflectirten Str. wirklich vereinigen, **reelles Bild**, oder von welchem, wie bei den ebenen Spiegeln, die reflectirten Str. herzukommen scheinen, **imaginäres** oder **virtuelles Bild**; wenn demnach die refl. Str. sich alle in dem Bildpunkte schneiden, so liegt das Bild auch auf jedem reflectirten Str., also auch auf dem Hauptstrahle. Die optische Achse ist ebenfalls ein Hauptstrahl; folglich liegt das Bild jedes Punktes der optischen Achse auf derselben. Dies erleichtert das geometrische Auffinden der Bilder von Lichtpunkten; liegt z. B. ein solcher Punkt i in der optischen Achse, so hat man nur noch einen refl. Str. nöthig, um durch seinen Schnitt mit der Achse den Bildpunkt zu erhalten; man zieht z. B. den Strahl io, trägt dessen Einfallswinkel α auf die andere Seite des Einfallslothes co, so erhält man in dem Schnitte i′ des refl. Str. oi′ mit der optischen Achse sofort das Bild i′. Den Abstand mi des Gegenstandes i von dem Spiegel bezeichnet man mit d, Distanz, Gegenstandsweite, den Abstand mi′ des Bildes i′ vom Spiegel mit b, Bildweite, und den halben Radius r der Kugelfläche, $r/_2$ mit f, Brennweite; der Punkt F nämlich, der in der Mitte zwischen dem optischen und dem geometrischen Mittelpunkte liegt, wird aus bald erhellenden Gründen Brennpunkt (Focus) genannt.

Zwischen diesen Punkten und ihren Entfernungen bestehen sowohl für den nach einwärts gebogenen, concaven oder Hohlspiegel, Fig. 180 u. 181, als auch für den auswärts gebogenen, convexen Spiegel, Fig. 183, vorausgesetzt, daß sie sphärische

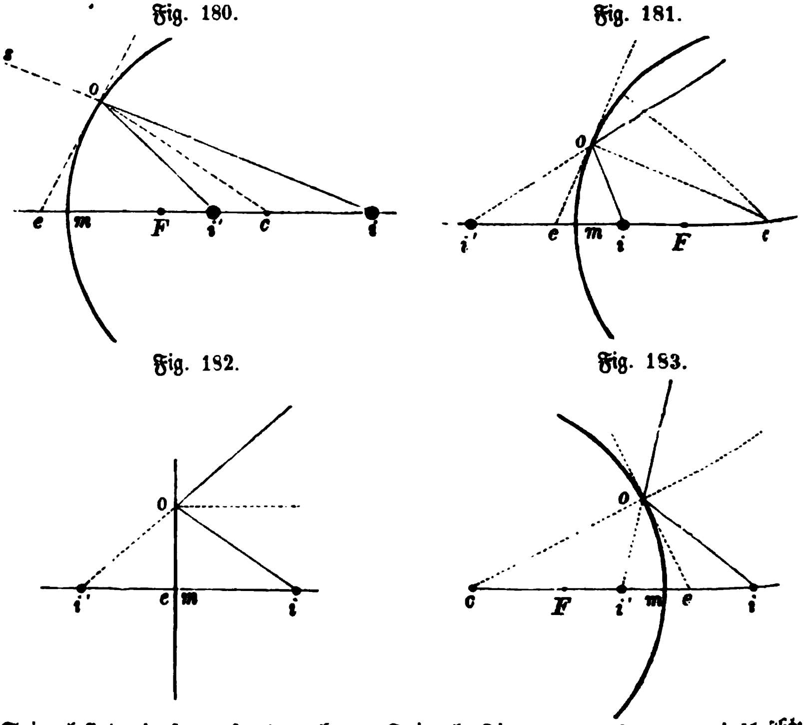


Fig. 180. Fig. 181. Fig. 182. Fig. 183.

Spiegel sind, ja sogar für den ebenen Spiegel, Fig. 182, mehrere gemeinschaftliche Gesetze, von denen wir die wichtigsten (nach Bauer 1875) hervorheben und beweisen wollen:

I. Der Krümmungsradius wird durch einen in ihm oder in seiner Verlängerung liegenden Punkt und dessen Bild harmonisch getheilt.

Beweis (Fig. 180). Nach einem bekannten geometrischen Lehrsatze findet, da $\measuredangle$ i'oi durch das Loth co halbirt wird, folgende Proportion statt, $i'c : ic = i'o : io$. Da der Außenwinkel soi' des Dreiecks i'oi durch die Tangente oe halbirt wird, so besteht ebenfalls nach der Geometrie auch die Proportion $i'e : ie = i'o : io$; durch Verbindung beider Proportionen erhält man $i'c : ic = i'e : ie$. Denkt man sich nun den Punkt o auf dem Hohlspiegel gegen m hin bewegt, so nähert sich e ohne Ende dem Punkt m; setzt man also voraus, daß nur Str., die in der Nähe des Centrums m auf den Spiegel fallen, sogenannte centrale Strahlen, in Betracht gezogen werden, so kann man mit großer Annäherung statt des Punktes e den Punkt m setzen und erhält dann die Proportion $i'c : ic = i'm : im$ oder $i'c : ic = b : d$, womit der Satz bewiesen ist. Unter der angegebenen Voraussetzung ist demnach $b = d \,.\, i'c / ic$, d. h. die Lage des Bildes ist von der Lage der Str. unabhängig, alle centralen Str. vereinigen sich in dem Bildpunkte (für die Randstrahlen gilt dies nicht mehr); und zwar vereinigen sich in dem Falle, der in Fig. 180 vorgestellt ist, die Reflectirten oi' und mi' wirklich, es entsteht ein reelles Bild, das bei greller Beleuchtung frei in der Luft schwebt, bei schwächerer Beleuchtung aber auf einer Tafel aufgefangen oder in düsterem Rauch und Staub sichtbar werden kann. In den folgenden Fig. gehen die reflectirten Str. auseinander, scheinen jedoch von einem Punkte i' hinter dem Spiegel auszugehen und erzeugen daher an diesem Punkte ein imaginäres Bild. Leicht ist der Beweis auf diese 3 Fälle auszudehnen; für den Planspiegel ist nur zu bemerken, daß e wirklich mit m zusammenfällt und demnach die oben bemerkte Beschränkung hier nicht stattfindet, und daß $mi' = mi$, daß daher nach den Lehren der harmonischen Theilung der zu m conjugirte Punkt c im Unendlichen liegt, was der ebenen Beschaffenheit des Spiegels entspricht.

II. Das Rechteck aus den Abständen des Brennpunktes von dem Licht- und dem Bildpunkte ist constant und zwar gleich dem Quadrat der Brennweite, oder die Brennweite ist die mittlere geometrische Proportionale zwischen den Abständen des Brennpunktes vom Licht- und vom Bildpunkte.

Beweis. Der Brennpunkt F liegt in der Mitte zwischen m und c, daher ist $mF = cF = f$. In unserer Proportion $ic : i'c = im : i'm$ kann daher gesetzt werden $iF - f$ statt ie, sodann $f - i'F$ statt i'c, ebenso $iF + f$ statt im und $i'F + f$ statt i'm; hierdurch entsteht die Proportion

$$(iF - f) : (f - i'F) = (iF + f) : (i'F + f) \text{ oder}$$
$$(iF + f) : (iF - f) = (f + i'F) : (f - i'F).$$

Wendet man hierauf die Summen- und Differenzen-Proportion an, so erhält man

$$2 \,.\, iF : 2f = 2f : 2 \,.\, i'F \text{ oder}$$
$$iF : f = f : i'F \text{ oder } f^2 = iF \,.\, i'F.$$

III. Der Abstand des Bildes vom Brennpunkte ist die dritte geometrische Proportionale zum Abstande des Brennpunktes vom Object und zur Brennweite oder $i'F = f^2 / iF$.

Directe Folgerung aus dem vorigen Satze.

IV. Die Größe des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Beweis (Fig. 184). Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke a'b'c und abc folgt $a'b : ab = i'c : ic$. Nun ist aber nach dem ersten Satze $i'c : ic = b : d$, also auch $a'b' : ab = b : d$.

Die Bilder der Hohlspiegel. Wenn die Lichtstrahlen von einem Punkte jen- 294 seits des geometrischen Mittelpunktes kommen, wie in Fig. 180, überhaupt wenn sie nicht stark divergiren, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen vor dem Spiegel wirklich, sie erzeugen ein reelles Bild. Wenn sie jedoch von einem dem Spiegel nahe gelegenen Punkte kommen, stark divergiren, wie in Fig. 181, so divergiren sie auch nach der Reflexion, sie scheinen jedoch von einem Punkte hinter dem Spiegel zu kommen, sie erzeugen ein imaginäres Bild. Für jeden der beiden Fälle läßt sich aus den allgemeinen Gesetzen eine Reihe von speciellen Gesetzen ableiten, von denen wir einige anführen wollen:

1. Für ein reelles Hohlspiegelbild ist die reciproke Brennweite gleich der Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Gegenstandsweite.

Beweis. 1. In der Proportion $i'c : ic = b : d$ ist (Fig. 180) $i'c = 2f - b$, $ic = d - 2f$; durch Substitution erhalten wir $(2f - b) : (d - 2f) = b : d$; hieraus $2df - bd = bd - 2bf$ oder $bd = df + bf$. Dividirt man diese Gleichung durch bdf, so ergibt sich $1/f = 1/b + 1/d$.

Beweis. 2. In dem Gesetze $f^2 = iF \cdot i'F$ ist in diesem Falle $iF = d - f$ und $i'F = b - f$; durch Substitution entsteht $f^2 = (d - f)(b - f) = bd - bf - df + f^2$, woraus $bd = df + bf$ und wieder $1/f = 1/b + 1/d$. Da $f = r/2$, so heißt die Formel auch $1/b + 1/d = 2/r$ . . . . (41)

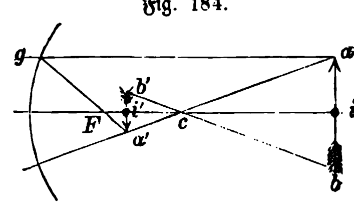
2. Die doppelte Brennweite ist das harmonische Mittel zwischen der Bildweite und der Gegenstandsweite. Beweis leicht u. s. w.

Aus diesen speciellen Gesetzen, sowie aus den allgemeinen läßt sich die Lage und die Größe der Hohlspiegelbilder für jede beliebige Lage des Gegenstandes ableiten; wir wollen diese Ableitung aus dem Hauptgesetze III vornehmen, dem Studirenden empfehlend, dieselbe auch aus den übrigen Gesetzen zu versuchen. Es entstehen hierdurch die 6 Hohlspiegelregeln:

a. Ein unendlich weit entfernter Gegenstand hat sein Bild im Brennpunkte; das Bild ist unendlich klein.

Denn in der Formel $i'F = f^2 / iF$ ist in diesem Falle $iF = \infty$, also $i'F = 0$; das Bild liegt im Brennpunkte. Nach IV. verhält sich daher die Bildgröße zum Gegenstand wie $0 : \infty$, also ist das Bild unendlich klein. Im Verhältnisse zur Spiegelgröße ist schon die Entf. der Sonne unendlich groß; also werden die parallelen Sonnenstr. im Brennpunkte eines Hohlspiegels vereinigt; es entsteht in demselben eine große Hitze und starkes Licht, woher sich der Name Brennpunkt erklärt. Man kann diese Eigenschaft benutzen, um den Brennpunkt eines Hohlspiegels praktisch zu finden. Dieselbe Eigenschaft der Hohlspiegel soll schon von Archimedes zur Anzündung der römischen Schiffe benutzt worden sein; doch versuchten Buffon, Tschirnhausen u. A. es im vorigen Jahrhundert selbst mit riesigen Spiegeln vergeblich, eine Wirkung auf einige Hunderte von Fußen hervorzubringen. Die Akademie zu Florenz verbrannte 1694 in dem Brennpunkte eines Hohlspiegels einen Diamant und veranlaßte so die Entdeckung, daß der Diamant krystallisirter Kohlenstoff ist. Eine wesentlichen Anwendung hat die Eigenschaft des Hohlspiegels, zur Achse parallele Strahlen in den Brennpunkt zu reflectiren, in der Optik zur geometr. Constr. der Bilder (Fig. 184). Das Bild von a liegt jedenfalls auf dem Hauptstrahle ac, der also der erste Constructionsstrahl ist; den zweiten erhält man durch den zur Achse parallelen Str. ag; man zieht von g durch F eine gerade Linie, so gibt dieselbe die Lage des reflectirten Str. und durch ihren Schnitt a′ mit dem Hauptstr. ac das Bild des Punktes a an. Construirt man auf diese Weise die Bilder aller Punkte von ab, so ergibt sich, was übrigens auch aus den Gesetzen hervorgeht, daß alle Bildpunkte dieselbe Lage gegen einander haben wie die Punkte des Gegenstandes, daß also das Bild dem Gegenstande gleich oder ähnlich ist, und ähnlich gegen den Spiegel liegt wie der Gegenstand. Es bedarf daher zur Auffindung eines Bildes nicht der Constr. aller Bildpunkte; hat man z. B. das Bild i′ des Punktes i, so ist auch die Lage des Bildes im Ganzen bekannt; zur Feststellung seiner Größe und der Lage der einzelnen Punkte sind nur noch die Bilder der Grenzpunkte nöthig; diese erhält man durch die Hauptstrahlen ac und bc der Grenzpunkte, da auf diesen die Bilder der Grenzpunkte liegen müssen. Die Grenzhauptstrahlen geben also die Größe und Stellung des Bildes an, zeigen z. B., daß in Fig. 184 ein umgekehrtes Bild entsteht.

Fig. 184.



b. Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Unendlichen und dem geometrischen Mittelpunkte, so entsteht zwischen dem Brennpunkte und dem Mittelpunkte ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes Bild, das um so näher am Brennpunkte liegt und um so kleiner ist, je größer die Entfernung des Gegenstandes ist.

Denn in der Formel $i'F = f^2 / iF$ ist in diesem Falle $iF < \infty$, also ist $i'F > 0$; und $iF > f$, also ist $i'F < f$, womit die Lage bestimmt ist. Da hiernach $b < d$, so ist nach Satz IV das Bild kleiner als der Gegenstand, und zwar um so kleiner, je größer d im Verhältniß zu b ist, je weiter also der Gegenstand entfernt ist. Die Grenzhauptstrahlen kreuzen sich wie in Fig. 184 zwischen Bild und Gegenstand; also ist das Bild umgekehrt. Dieses Gesetz hat Anwendung in den Spiegelteleskopen.

c. **Liegt der Gegenstand im Mittelpunkte, so fällt sein Bild mit ihm zusammen.**

Denn III ergibt, daß $i'F = f^2/f = f$, und IV, daß Bild = Gegenstand, weil $b = d$.

d. **Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte, so entsteht jenseits des Mittelpunktes ein reelles, vergrößertes, umgekehrtes Bild, das um so weiter entfernt und um so größer ist, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte liegt.**

Denn in der Formel $i'F = f^2/iF$ ist in diesem Falle $iF < f$, also $i'F > f$, und zwar wird $i'F$ um so größer, je kleiner iF ist, womit die Angaben über die Lage bewiesen sind. Da hiernach $b > d$, so ist das Bild größer als der Gegenstand, und zwar um so größer, je größer b im Verhältnisse zu d ist, je näher also der Gegenstand dem Brennpunkte kommt. Das Bild ist umgekehrt, weil Bild und Gegenstand auf verschiedenen Seiten des Kreuzungspunktes der Grenzhauptstrahlen liegen.

e. **Befindet sich der Gegenstand im Brennpunkte, so ist sein Bild im Unendlichen, die reflectirten Strahlen sind parallel.**

Denn hier ist $iF = 0$, also ist $i'F = f^2/0 = \infty$; da sich die refl. Str. erst im Unendlichen, d. h. gar nicht treffen, so sind sie parallel. Diese Eigenschaft hat Anwendung auf Leuchtthürmen, Theatern u. s. w., da durch die refl. Str. eines grellen im Brennpunkte befindlichen Lichtes die ganze kreisförmige Spiegelscheibe gleichmäßig hell und weithin leuchtend wird. Doch werden hierzu besser parabolische als sphärische Spiegel verwendet, weil erstere nicht blos die centralen, sondern alle Str. parallel reflectiren.

f. **Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so entsteht hinter dem Spiegel ein imaginäres, vergrößertes, aufrechtes Bild, das um so größer und um so weiter entfernt ist, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte liegt.**

Denn für einen solchen Gegenstand (Fig. 181) hat iF die entgegengesetzte Richtung wie bisher, ist also negativ und an Zahlenwerth kleiner als f; folglich ist nach III auch $i'F$ negativ und an Zahlenwerth größer als f, und zwar um so größer, je kleiner iF ist; das Bild liegt also hinter dem Spiegel, es ist imaginär. Da dasselbe vom Spiegel ins Unendliche rückt, wenn der Gegenstand vom Spiegel bis in den Brennpunkt geht, so ist die Bildweite größer als die Gegenstandsweite, also auch nach IV das Bild größer als der Gegenstand. Es ist aufrecht, weil es mit dem Gegenstande auf derselben Seite der Kreuzung der Grenzhauptstrahlen liegt. Für diesen Fall erhalten auch die speciellen Gesetze eine veränderte Gestalt: 1. Die reciproke Gegenstandsweite ist gleich der Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Brennweite. 2. Die doppelte Gegenstandsweite ist das harmonische Mittel zwischen der Brennweite und der Bildweite u. s. w., was man leicht durch Anwendung der allgemeinen Sätze auf Fig. 181 finden kann. Dieser Fall hat in dem hohlen Vergrößerungsspiegel Anwendung (Rasirspiegel).

Man weist die 6 *Hohlspiegel-Regeln* nach mittels der optischen Bank, einer eingetheilten Holzschiene, auf der ein Hohlspiegel, ein Lichthalter und ein Bildschirm verschoben werden können. Ist das Licht sehr weit entfernt, so sieht man nahe am Spiegel ein winzig kleines, umgekehrtes Flämmchen; je näher das Licht kommt, desto mehr muß man ihm den Schirm entgegenrücken, und desto größer wird das umgekehrte Flammenbildchen. Ist das Licht bis in den Mittelpunkt gewandert, so stößt es mit dem Schirme zusammen, und zur Fortsetzung des Versuches muß man ihre Stellungen wechseln; man sieht nun das Bild sehr rasch wachsen und endlich, wenn das Licht im Brennpunkte angelangt ist, in einen formlosen Schein zerfließen, während der ganze Spiegel blendend beleuchtet ist; sogleich taucht hinter dem Spiegel ein riesig großes, aufrechtes Flammenbild auf, das bei weiterer Annäherung des Lichtes ebenfalls heranrückt, kleiner wird und endlich am Spiegel mit dem Lichte zusammenfällt.

Alle diese Gesetze und Erscheinungen gelten nur genau unter der Voraussetzung, daß nur centrale Str. zur Vereinigung zugelassen werden; denn nur diese vereinigen sich in einem Punkte, während die weiter vom Centrum entfernt auftreffenden Str. andere Vereinigungspunkte besitzen, wie eine einfache Constr. ergibt; und zwar liegen die Vereinigungspunkte allmälig immer weiter entfernter Str. immer nahe beisammen, so daß statt eines Bildlichtpunktes eine Lichtlinie entsteht, die man *Brennlinie* oder *katakaustische Curve* nennt. Hierdurch entsteht eine Undeutlichkeit der Bilder sphärischer Spiegel, welche man die *sphärische Abweichung* nennt. Parabolische Spiegel haben diesen Fehler für parallel auftreffende Str. nicht, werden also für die in e angeführten Anwendungen besonders benutzt.

Die Bilder der Convexspiegel. **Convexspiegel erzeugen nur imaginäre, verkleinerte, aufrechte Bilder, die um so kleiner und um so weiter entfernt sind, je größer die Entfernung des Gegenstandes ist.** 295

Denn, wie Fig. 183 zeigt, werden die Str. des Punktes i so reflectirt, daß sie von

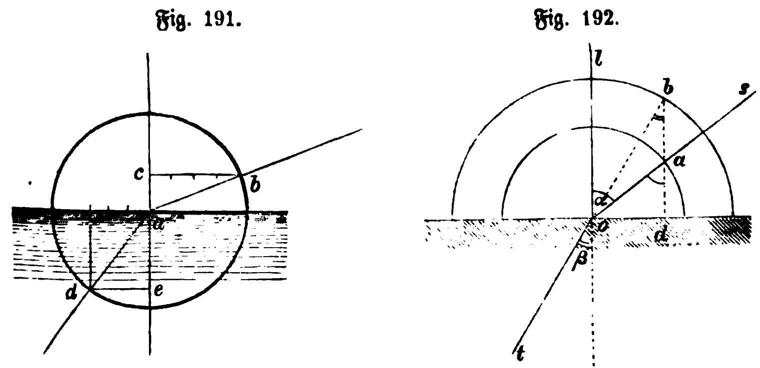
einem Punkte hinter dem Spiegel zu kommen scheinen: das Bild ist imaginär. Es liegt mit dem Gegenstande auf einer Seite des Kreuzungspunktes der Grenzhauptstrahlen, ist also aufrecht. Das Gesetz der reciproken Werthe nimmt wieder eine andere Gestalt an; denn hier ist in der Proportion des I. Gesetzes $i'c : ic = i'm : im$ nach Fig. 183 zu setzen $2f - b$ statt $i'c$, sodann $2f + d$ statt ic, weiter b statt $i'm$ und d statt im, wodurch man erhält $(2f - b) : (2f + d) = b : d$ oder $2df - bd = 2bf + bd$ oder $bd = df - bf$, woraus sich durch Division mit bdf ergibt $1/f = 1/b - 1/d$ oder $1/b = 1/d + 1/f$. Aus diesem Gesetze der reciproken Werthe folgt, daß b immer kleiner ist als d, daß also nach Gesetz IV das Bild immer kleiner ist als der Gegenstand, sodann daß b mit d, aber langsamer zunimmt als d, daß daher die Bilder mit wachsender Entf. des Gegenstandes sich langsam entfernen und langsam kleiner werden. Ist z. B. $d = f$, so ist $b = 1/2 f$; ist $d = \infty$, so ist $b = f$. Ein einigermaßen weit entfernter Gegenstand hat daher ein außerordentlich kleines Bild am Brennpunkte des Spiegels; daher werden solche Spiegel zu physikalischen Versuchen und außerdem als Gartenschmuck verwendet.

296 **Anwendung und Anfertigung der Spiegel.** Die Planspiegel oder auch schwachgekrümmten Spiegel, die zum Hausgebrauche dienen, sind gewöhnlich Glastafeln, die auf der Rückseite mit Zinnamalgam belegt sind. Glas für sich allein reflectirt nämlich zwar ebenfalls das Licht, läßt aber gewöhnlich so viel Licht durch, daß das schwache refl. Licht neben dem starken durchgelassenen verschwindet; nur wenn Glasscheiben einen dunkeln Hintergrund haben, wie an eine dunkle Wand gelehnte Fensterscheiben oder Fenster bei Nacht, spiegeln sie einigermaßen. Damit sie stärker spiegeln, gibt man ihnen durch den Beleg eine undurchsichtige Rückseite, die Spiegelfolie; denn alsdann lassen sie kein Licht durch, werfen alle sämmtliche auffallende Str. zurück und werden so zu Spiegeln. Die Spiegelfolie wird hervorgebracht, indem man eine sehr dünne Stanniolplatte auf einer horizontalen Tafel ausbreitet, dieselbe mit Quecksilber bespritzt und dann die Glastafel mit Vorsicht auf die Stanniolplatte schiebt und etwa einen Tag lang aufpreßt. In neuerer Zeit wird als Spiegelfolie eine dünne Silberschicht angewendet, welche auf chemischem Wege auf der Rückseite der Glastafel niedergeschlagen wird. Liebigs Methode (1856) zur Bildung dieser Silberhaut ist folgende: Die Glastafeln werden in ein 25° warmes Bad aus Wasser, einer Versilberungsflüssigkeit und einer Reductionsflüssigkeit gebracht; erstere besteht aus Lösungen von Silbernitrat, Ammoniumsulfat und Aetznatron, letztere aus Lösungen von Candiszucker, Weinsäure, weinsaurem Kupfer und Aetznatron. Den Spiegeln mit Silberfolie schreibt man eine stärkere reflectirende Kraft, helleren Glanz und stärkeres Feuer als den Quecksilberspiegeln zu; auch sind sie nicht wie diese der Gesundheit der Arbeiter schädlich. Um das dünne Silberhäutchen zu schützen, wird es gefirnißt oder galvanisch verkupfert. Indessen haben alle Spiegel mit spiegelnder Rückseite den Nachtheil, daß sie mehrere Bilder erzeugen, und daß daher das Hauptbild undeutlich wird. Dieses Hauptbild wird nämlich von der Belegung hervorgerufen; doch gibt die Vorderseite des Glases ebenfalls ein Bild, das zwar bei senkrechtem Auffallen der Str. mit dem von der Rückseite gebildeten zusammenfällt und auch bei schiefer Richtung der Str. wegen seiner Schwäche in Fällen des gewöhnlichen Lebens nicht bemerkt wird; spiegelt sich aber ein heller Lichtpunkt, wie es bei optischen Versuchen häufig vorkommt, so sieht man von der Seite her zwei und mehr Bilder, eines von der Vorderseite, eines von der Rückseite, ein drittes, welches durch Reflexion der Str. des zweiten an der Vorder- und der Rückseite gebildet wird, ein viertes, das durch dieselbe zweimalige Refl. entsteht u. s. w.; diese Bilder sind um so weiter von einander entf. und daher um so deutlicher, je größer die Dicke des Spiegels ist, die man ungefähr durch das Aufsetzen eines spitzigen Gegenstandes auf die Vorderfläche des Spiegels erkennen kann. Da die Nebenbilder das von der Rückseite gebildete Hauptbild undeutlich machen und verwirren, so sind für genaue und für messende Versuche die Glasspiegel unbrauchbar, ausgenommen, wenn die Rückseite geschwärzt ist; in diesem Falle absorbirt der schwarze Ueberzug alles durchgehende Licht, und es entsteht nur ein Bild von der Vorderseite, das aber sehr lichtschwach ist. Viel besser sind die Silber- oder Platinspiegel, welche aus einer auf der Vorderseite einer Glastafel niedergeschlagenen Silber- oder Platinschicht bestehen; denn dieselben geben nur ein Bild und zwar ein sehr helles, machen außerdem das Poliren der Rückseite überflüssig, und können auch als Blendgläser bei Sonnenbeobachtungen, als Spionirgläser und als Schutzbrillen verwendet werden, weil sie von der Rückseite her schwach durchsichtig sind. Die Methode von Dodé für Anfertigung der Platinspiegel ist folgende: Trocknes Platinchlorid mit Lavendelöl gemischt wird mit Bleiglätte und Bleiborat zusammengerieben, die Mischung mit einem Pinsel auf die polirte Glasfläche getragen, und die Glastafel dann in einer gußeisernen Muffel in einem eigenen Ofen erhitzt, wodurch das Platin reducirt und in die Tafel eingebrannt wird. — Auch große Hohlspiegel für Teleskope wurden schon 1858 von Foucault aus versilbertem Glase angefertigt. Sehr vortrefflich wären die Stahlspiegel, weil sie die feinste Politur zulassen, wenn sie nicht dem Rosten ausgesetzt wären. Die Legirung der gewöhnlichen Metallspiegel besteht aus 64 Th. Kupfer und 20 Th. Zinn, oder aus 1 Th. gutem Messing und 1 Th. Arsenik.

Wasser gefüllt sind. Die Verrückung ist um so größer, je dicker der Körper ist; daher sehen wir durch unsere Fensterscheiben die Gegenstände nur sehr wenig verschoben. (Die Größe der Verschiebung s. 300.) — 8. Wenn die Eingangs- und die Austrittsfläche eines Strahles nicht parallel sind, wenn also der Körper ein Prisma ist, so wird die Richtung des Strahles stark verändert, und außerdem wird der Strahl in seine Farbenbestandtheile zerlegt. Diese beiden wichtigen Erscheinungen bedürfen einer später folgenden speciellen Betrachtung.

Kennt man den Brechungsexp. eines Körpers, so kann man die Lage des gebrochenen Str. nicht blos berechnen, sondern auch durch geom. Constr. finden. Man beschreibt um den Fußpunkt a (Fig. 191) des einfallenden Str. ba mit dem Radius = 1 einen Kreis und fällt von dem Schnittpunkte b dieses Kreises mit dem Str. eine Senkrechte bc auf das Einfallsloth: diese ist der Sinus des Einfallswinkels. Für den Uebergang aus Luft in Wasser muß der Sinus des Brechungswinkels 3 sein, wenn der des Einfallswinkels 4 ist; man theilt also bc in 4 gleiche Theile und trägt 3 davon auf die Oberfläche des neuen Mediums von a aus. Durch eine Senkrechte bringt man diesen Abstand an seine richtige Stelle de und hat dann in ad den gebrochenen Str. Einfacher und allgemeiner ist die Constr. von Reusch (1862): Man schlage um den Einfallspunkt o (Fig. 192) des Str. so

Fig. 191. Fig. 192.



zwei Kreise, deren Radien im Verhältnisse der Lichtgeschw. in beiden Medien stehen, z. B. für Luft in Crownglas wie 3 : 2, ziehe durch den Schnittpunkt a des Str. mit dem Kreise des neuen Mediums eine Parallele db zu dem Einfallslothe *lo*, und verbinde den Schnittpunkt b dieser Parallelen und des Kreises des alten Mediums mit dem Einfallpunkte o, so ist die Verlängerung ot dieser Verbindungslinie der gebrochene Str. Denn der Winkel oad $= \alpha$ und der Winkel obd $= \beta$. Nun ist aber sin obd, also auch $\sin \beta = od / ob$ und sin oad also auch $\sin \alpha = od / oa$. Durch Division der letzteren Gl. mit der ersteren erhält man $\sin \alpha / \sin \beta = ob / oa = c / c' = n$, hier $= {}^3/_2$. — Von den Gesetzen 5 und 6 bilden die brennbaren Körper eine Art von Ausnahme; so Diamant, Schwefelkohlenstoff, Terpentinöl, Spiritus. Sie brechen das Licht stärker zum Lothe als andere Körper von gleicher und von größerer Dichte; sie concentriren daher das Licht mehr und leuchten stärker als andere Körper. — Durch ein polyedrisches Glas sieht man Gegenstände vielfach, weil aus jeder Fläche die Str. in anderer Richtung treten; dioptrische Anamorphosen. — Vermöge der Brechung erscheinen Himmelskörper, wie auch ferne, hohe irdische Körper höher als sie sind: man nennt diese Erscheinung die astronomische und die terrestrische Strahlenbrechung. Die Str. der Himmelskörper gehen nämlich aus dem leeren Raume in dünne und dann in immer dichtere Luftschichten über; sie werden also fortwährend zum Lothe gebrochen. Wenn sie schon lothrecht sind, so ist diese Brechung unmöglich; die Brechung ist also für das Zenith gleich Null; die Str. aber, die vom Horizont in die Luft herein kommen, treffen die Luftschichten unter sehr schiefen Winkeln, erfahren also eine starke Brechung, eine starke Annäherung an das Loth. Sie gelangen in das Auge, als ob sie mehr von oben kämen; die Himmelskörper erscheinen höher als sie sind. Am Horizont beträgt die Brechung ca. $^1/_2{}^0$; Sonne und Mond erscheinen daher schon auf- oder noch nicht untergegangen, wenn sie eben unter dem Horizonte stehen; dies hat eine Verlängerung des Tages zur Folge, die in den polaren Gegenden sehr beträchtlich ist. Die Strahlenbrechung nimmt vom Horizont an rasch ab; während sie genau in demselben 35′ beträgt, ist sie in $^1/_2{}^0$ Höhe nur noch 28′; daher wird der untere Rand von Sonne und Mond mehr gehoben als der obere; diese beiden

Zahl des Quotienten $360 / \alpha$ sein
Constr. Fig. 187, daß in jedem Se
Zu beweisen, daß ein Spiegel den
And.: Hauptsatz in 292. — A. 508
über einander gesehenen Objecte au
man, daß $\alpha + \beta = 90°$; dann ist
Zu beweisen, daß im Spiegelsextan
über und in dem festen Spiegel se
Drehwinkel der Alhidade? And.: d
qap; der Winkel, um welchen die
man hat also zu beweisen, daß qap
gleichheiten leicht ist. Diese Gleichh

Fig. 189.

beide Tageszeiten. — A. 514. Der
von Punkten und Gegenständen in
und noch denkbaren Fälle nach den i
bis 184. — A. 515. Wie groß ist
standsweite = 10r, 7r, 4r, 3r, 1
$b = dr / (2d - r)$, also hier $= {}^{10}/_{19}$ r
— A. 516. Wo liegen die Bilder
Aufl.: Nach 295. ist $b = dr / (2d +$
Bildweite für beide Spiegelarten du
und $b = df / (d + f)$. — A. 518.
drücken? Aufl.: $f = bd / (d \mp b)$. —
Bild in 5cm Entf. hat, wie groß is
Wie groß ist ein Bild l' im Hohlspi
dehnung $= l$ ist? Aufl.: Nach Gesetz
$l' = l (2f - b) / (d - 2f)$; hierin de
A. 521. Hieraus zu suchen, wann
Wenn $d = \infty$, 3f, 2f, ${}^3/_2$f, 1,1f,
verspiegel anzugeben? Aufl.: $l' = l$
Name Brennweite geeignet? Aufl.:
nicht, sondern werden durch den S
auftreffende Str. werden so zerstreu
dessen Spiegelabstand = f ist, her
A. 524. Wie groß ist das Sonne
ist 2f tang $16' = {}^1/_{108}$ f. — A. 52
einem Spiegel, dessen Durchmesser
fallen, werden in den Kreis conce
Concentration $d^2 / ({}^1/_{108} f)^2 = (108$
wenn statt des Spiegeldurchmessers
geben ist? Aufl.: Durchmesser d
$\sin^2 \alpha / ({}^1/_{108} f)^2 = (432 \sin \alpha)^2$. —
Spiegel, dessen Apertur 60° ist?
die Temperatur einer gegebenen D

stimmten Zeit z. B. in 1 Minute um 20° steigt, wie hoch steigt sie dann im Brennpunkte jenes Hohlspiegels? Aufl.: 20 . 46656 = 933 120°.

5. Die Lehre von der Brechung des Lichtes.

Die Dioptrik.

Begriff und Gesetze der Brechung. (Snellius 1620). Unter der Brechung des Lichtes versteht man die Ablenkung, welche die Lichtstrahlen erfahren, wenn sie aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes übergehen. **298**

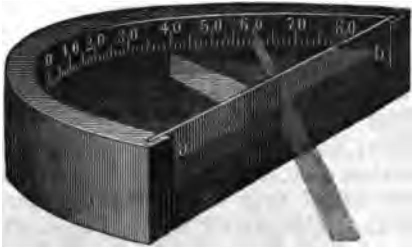
In verschiedenen Körpern hat nämlich der Aether eine verschiedene Dichte, z. B. in dichteren Körpern gewöhnlich eine größere Dichte, weil durch die größere Molekular-Anziehung dichterer Körper auch eine größere Aethermenge in dem Inneren des Körpers festgehalten wird; die Elasticität des Aethers muß aber in verschiedenen Körpern gleich sein, weil sonst Aether aus dem einen Körper in den anderen treten müßte; es ist dies auch leicht dadurch erklärlich, daß die größere Abstoßung des dichteren Aethers durch die größere Anziehung der Körperatome aufgewogen wird. Hiernach muß für dichtere Stoffe der bekannte Ausdruck $\sqrt{(e : d)}$ kleiner werden und daher die Fortpflanzungsgeschw. des Lichtes abnehmen. Dies ergibt sich auch aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft: denn damit in dem Medium mit dichterem Aether die lebendige Kraft der fortschreitenden Schwingungsbewegung dieselbe bleibe, muß die Geschw. derselben kleiner werden. Für das Wasser haben Fizeau und Foucault wirklich die Lichtgeschw. gleich $^3/_4$ von der Geschw. in der Luft gefunden. Wenn nun aber eine Wellenbewegung ihre Geschw. ändert, so werden nach 232. die Strahlen derselben von ihrer Richtung abgelenkt; folglich müssen auch die Lichtstrahlen von ihrer Richtung abgelenkt, gebrochen werden, und zwar nach folgenden zwei, in 232. für alle Wellenbewegungen bewiesenen Gesetzen.

1. Der gebrochene Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene. 2. Der gebrochene und der einfallende Strahl liegen auf entgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche und des Einfallslothes, und der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem constanten Verhältnisse. Dieses Verhältniß ist gleich dem Quotient der Geschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien, wird Brechungsexponent genannt und mit n bezeichnet; es ist sonach

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (31)$$

Für den Uebergang aus einem dünneren in ein dichteres Medium ist n gewöhnlich größer als 1, weil die Lichtgeschwindigkeit in dünneren Stoffen meistens größer ist als in dichteren; für den Uebergang aus einem dichteren Medium in ein dünneres ist n gewöhnlich kleiner als 1; z. B. für den Uebergang aus Luft in Wasser ist der Brechungsexponent n = $^4/_3$, für den Uebergang aus Wasser in Luft $^3/_4$, aus Luft in Glas $^3/_2$, aus Glas in Luft $^2/_3$. Je größer der Brechungsexponent ist, desto größer ist der Unterschied zwischen dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel, desto stärker ist also die Brechung; der Brechungsexponent gibt also ein ungefähres Maß für die Stärke der Brechung verschiedener Stoffe. Diamant gehört zu den stärkst brechenden Stoffen; denn sein Brechungsexp. ist sehr nahe $^5/_2$.

Fig. 190.



Den Nachweis für den Vorgang und die Gesetze der Brechung kann man am einfachsten mit dem halbkreisförmigen Gefäße (Fig. 190) führen, dessen krumme Grenzfläche eine Gradeintheilung trägt, während die gerade, in den Dm. fallende Grenzfläche ab an der Stelle des Mittelpunktes durchsichtig ist und einem Lichtstreifen Eingang gestattet; an der Gradeintheilung kann man den Einfallswinkel ablesen. Gießt man das Gefäß nun halb voll Wasser, so bleibt die obere Hälfte des Lichtstreifens an der früheren Stelle stehen, in der Fig. bei 60°;

die untere durch das Wasser gehende Hälfte dagegen ist abgelenkt, in der Fig. auf 40°. Sucht man mittels der Logarithmentafel das Sinusverhältniß der 2 Winkel, so findet man dasselbe = $^4/_3$. Denselben Versuch wiederholt man für beliebig viele Einfallswinkel und findet dann immer dasselbe Resultat, womit das 2. Gesetz nachgewiesen ist. Da die untere Hälfte des Lichtstreifens weder an der oberen noch an der unteren Grenze eine Veränderung zeigt, so ist damit auch das 1. Gesetz dargethan.

Aus dem Hauptgesetze $\sin\alpha / \sin\beta = n$ folgt noch eine Reihe anderer Gesetze: 3. Stehen die Strahlen auf der Oberfläche des neuen Mediums senkrecht, so gehen sie ungebrochen weiter. Denn für $\alpha = 0$ ergibt die Fl. (31) auch $\beta = 0$; der Nachweis ist mit dem Brechungsgefäße zu führen. — **4. Je größer der Einfallswinkel ist, oder je schiefer die Strahlen auftreffen, desto stärker ist die Brechung.** Beweis: $\sin\alpha / \sin\beta = n$ ergibt nach einem Satze aus der Proportionslehre $\sin\alpha - \sin\beta : \sin\beta = n - 1 : 1$, woraus $\sin\alpha - \sin\beta = (n - 1) \sin\beta$; führt man hierin die bekannte Formel für die Differenz zweier Sinusse ein, so folgt $2 \sin {}^1/_2 (\alpha - \beta) \cos {}^1/_2 (\alpha + \beta) = (n - 1) \sin\beta$, woraus sich ergibt $\sin {}^1/_2 (\alpha - \beta) = (n - 1) \sin\beta / 2 \cos {}^1/_2 (\alpha + \beta)$. Hieraus ist ersichtlich, daß die Differenz $\alpha - \beta$ wächst, wenn β und daher auch α zunimmt; denn alsdann nimmt der Zähler des Bruchwerthes zu und der Nenner ab. Das Brechungsgefäß kann auch hier zum Nachweise benutzt werden. — **5. Geht der Strahl aus einem dünneren in ein dichteres Medium über, so wird er gewöhnlich zum Lothe gebrochen;** denn für diesen Fall ist $\sin\alpha / \sin\beta > 1$, also ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel, der gebrochene Strahl ist dem Lothe näher als der einfallende. Zum Nachweise für Wasser und andere Flüssigkeiten kann das Brechungsgefäß dienen. Läßt man in ein dunkles Zimmer einen Lichtstrahl schief gegen den Boden fallen und stellt ihm dann einen Glaswürfel in den Weg, so liegt der Fußpunkt des Strahles weiter zurück als vorher. — **6. Geht der Strahl aus einem dichteren Medium in ein dünneres über, so wird er gewöhnlich vom Lothe gebrochen;** denn für diesen Fall ist $\sin\alpha / \sin\beta < 1$, also ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel, der gebrochene Strahl liegt weiter von dem Lothe weg als der einfallende. Zum Nachweise dient folgender Versuch: Man lege in ein undurchsichtiges Gefäß eine Münze und stelle sich so, daß man dieselbe eben nicht mehr sehen kann; es werden dann die von der Münze nach dem Auge gerichteten Strahlen von dem Rande aufgefangen, und in die Luft neben dem Gefäße gelangen nur höher gerichtete Strahlen, Strahlen mit kleineren Einfallswinkeln. Gießt man nun Wasser in das Gefäß, so wird die Münze sichtbar; es sind also die in die Höhe gerichteten Strahlen bei dem Austritte aus dem Wasser nach dem Auge hin abgelenkt worden, sie sind mehr der Wasserfläche genähert, vom Lothe entfernt worden. Da das Auge einen Gegenstand immer in derjenigen Richtung sieht, in welcher dessen Strahlen in das Auge gelangen, und da hier die ins Auge gelangenden Strahlen viel flacher als die directen Verbindungsstrahlen gerichtet sind, so muß das Auge die Münze höher erblicken als sie ist; ebenso sieht man den Boden von Wasser und Gegenstände in demselben immer höher als sie sind; ebenso erscheinen alle Theile eines schief eingetauchten Stabes höher, der Stab scheint an der Oberfläche geknickt zu sein. Uebrigens findet nach Bauer (1874) hierbei nicht blos eine senkrechte, sondern auch eine wagrechte Verschiebung nach dem Auge hin statt; beide sind bei senkrechter Betrachtung des Gegenstandes am kleinsten, die letztere = 0, die erstere für Wasser etwa $^1/_4$ der Höhe (Näheres 300.) — **7. Geht der Strahl durch ein Medium mit parallelen Eingangs- und Austrittsflächen, so wird er nicht von der Richtung abgelenkt, sondern nur ein wenig zur Seite gerückt;** denn er wird bei dem Eingange ebenso viel zum Lothe gebrochen als bei dem Austritte von einem demselben parallelen Lothe. Nachweise sind durch dicke Glastafeln oder durch Glasgefäße mit parallelen Seitenwänden zu führen, die mit

Wasser gefüllt sind. Die Verrückung ist um so größer, je dicker der Körper ist; daher sehen wir durch unsere Fensterscheiben die Gegenstände nur sehr wenig verschoben. (Die Größe der Verschiebung s. 300.) — 8. Wenn die Eingangs- und die Austrittsfläche eines Strahles nicht parallel sind, wenn also der Körper ein Prisma ist, so wird die Richtung des Strahles stark verändert, und außerdem wird der Strahl in seine Farbenbestandtheile zerlegt. Diese beiden wichtigen Erscheinungen bedürfen einer später folgenden speciellen Betrachtung.

Kennt man den Brechungsexp. eines Körpers, so kann man die Lage des gebrochenen Str. nicht blos berechnen, sondern auch durch geom. Constr. finden. Man beschreibt um den Fußpunkt a (Fig. 191) des einfallenden Str. ba mit dem Radius = 1 einen Kreis und fällt von dem Schnittpunkte b dieses Kreises mit dem Str. eine Senkrechte bc auf das Einfallsloth: diese ist der Sinus des Einfallswinkels. Für den Uebergang aus Luft in Wasser muß der Sinus des Brechungswinkels 3 sein, wenn der des Einfallswinkels 4 ist; man theilt also bc in 4 gleiche Theile und trägt 3 davon auf die Oberfläche des neuen Mediums von a aus. Durch eine Senkrechte bringt man diesen Abstand an seine richtige Stelle de und hat dann in ad den gebrochenen Str. Einfacher und allgemeiner ist die Constr. von Reusch (1862): Man schlage um den Einfallspunkt o (Fig. 192) des Str. so

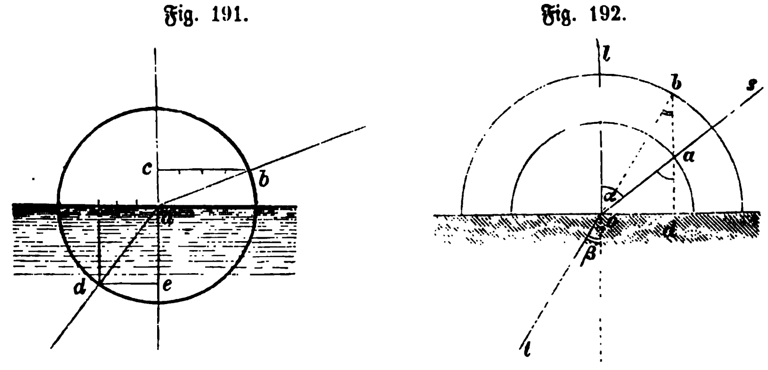


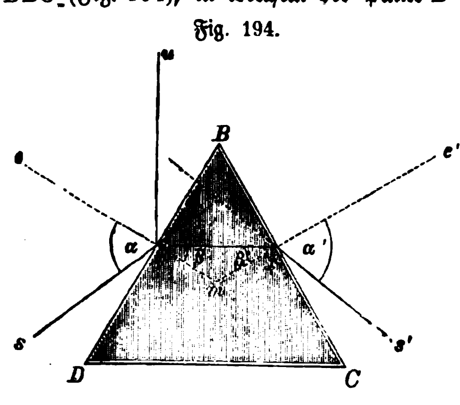
Fig. 191. Fig. 192.

zwei Kreise, deren Radien im Verhältnisse der Lichtgeschw. in beiden Medien stehen, z. B. für Luft in Crownglas wie 3 : 2, ziehe durch den Schnittpunkt a des Str. mit dem Kreise des neuen Mediums eine Parallele db zu dem Einfallslothe lo, und verbinde den Schnittpunkt b dieser Parallelen und des Kreises des alten Mediums mit dem Einfallpunkte o, so ist die Verlängerung ot dieser Verbindungslinie der gebrochene Str. Denn der Winkel oad $= \alpha$ und der Winkel obd $= \beta$. Nun ist aber sin obd, also auch $\sin\beta = od / ob$ und sin oad also auch $\sin\alpha = od / oa$. Durch Division der letzteren Gl. mit der ersteren erhält man $\sin\alpha / \sin\beta = ob / oa = c / c' = n$, hier $= 3/2$. — Von den Gesetzen 5 und 6 bilden die brennbaren Körper eine Art von Ausnahme; so Diamant, Schwefelkohlenstoff, Terpentinöl, Spiritus. Sie brechen das Licht stärker zum Lothe als andere Körper von gleicher und von größerer Dichte; sie concentriren daher das Licht mehr und leuchten stärker als andere Körper. — Durch ein polyedrisches Glas sieht man Gegenstände vielfach, weil aus jeder Fläche die Str. in anderer Richtung treten; dioptrische Anamorphosen. — Vermöge der Brechung erscheinen Himmelskörper, wie auch ferne, hohe irdische Körper höher als sie sind: man nennt diese Erscheinung die astronomische und die terrestrische Strahlenbrechung. Die Str. der Himmelskörper gehen nämlich aus dem leeren Raume in dünne und dann in immer dichtere Luftschichten über; sie werden also fortwährend zum Lothe gebrochen. Wenn sie schon lothrecht sind, so ist diese Brechung unmöglich; die Brechung ist also für das Zenith gleich Null; die Str. aber, die vom Horizont in die Luft herein kommen, treffen die Luftschichten unter sehr schiefen Winkeln, erfahren also eine starke Brechung, eine starke Annäherung an das Loth. Sie gelangen in das Auge, als ob sie mehr von oben kämen; die Himmelskörper erscheinen höher als sie sind. Am Horizont beträgt die Brechung ca. $1/2^\circ$; Sonne und Mond erscheinen daher schon auf- oder noch nicht untergegangen, wenn sie eben unter dem Horizonte stehen; dies hat eine Verlängerung des Tages zur Folge, die in den polaren Gegenden sehr beträchtlich ist. Die Strahlenbrechung nimmt vom Horizont an rasch ab; während sie genau in demselben 35′ beträgt, ist sie in $1/2^\circ$ Höhe nur noch 28′; daher wird der untere Rand von Sonne und Mond mehr gehoben als der obere; diese beiden

steigende Str. tiefer liegender Gegenstände sehr schief auf den höheren dünneren Schichten eintreffen und von diesen durch totale Refl. absteigend gemacht werden und daher ein höher liegendes Bild erzeugen. Scoresby beobachtete derartige Erscheinungen häufig in den Polarmeeren. Manche Fata Morgana und Kimmung mag ebenfalls auf Luftspiegelung beruhen.

300. **Brechung des Lichtes durch Prismen.** Unter einem Prisma versteht man in der Optik jede Einrichtung, mittels welcher ein Strahl durch einen Körper mit zwei gegen einander geneigten Flächen geht. Die häufigsten Prismen sind dreiseitig geschliffene Glasprismen; doch hat man auch solche von durchsichtigen Steinen und von Flüssigkeiten; die letzteren erhält man durch gefüllte, dreiseitig aus planparallelen Glastafeln zusammengesetzte Gefäße. Die Gerade, in welcher die Eintritts- und die Austrittsfläche eines durch ein Prisma gehenden Strahles sich schneiden, ist die brechende Kante, der Winkel dieser beiden Flächen an dieser Kante ist der brechende Winkel. Eine Ebene, die man senkrecht zur brechenden Kante durch ein Prisma legt, bildet eine Figur, die man Hauptschnitt nennt; für ein dreiseitiges, gleichseitiges Prisma ist der Hauptschnitt ein gleichseitiges Dreieck DBC (Fig. 194), in welchem der Punkt B die brechende Kante darstellt und der Winkel B den brechenden Winkel.

Fig. 194.



Durch ein solches Prisma erfährt ein Lichtstrahl st eine starke Ablenkung; denn schon bei dem Eintritte zu dem Lothe et der Eintrittsfläche gebrochen, gelangt er dann zu der Austrittsfläche, deren Loth e't' nicht mit dem ersten Lothe zusammenfällt, sondern mit demselben einen Winkel m, gleich dem Supplement des brechenden Winkels B einschließt; von diesem Lothe wird der Strahl nun bei dem Austritte noch weggebrochen; daher weicht der austretende Strahl t's' stark in der Richtung von dem eintretenden ab. Ein Gegenstand erscheint durch ein Prisma gesehen an einer ganz anderen Stelle, und zwar geschieht die Verrückung immer nach derjenigen Richtung hin, in welcher die brechende Kante liegt, wie aus der Figur leicht zu ersehen ist. Der Winkel A, um welchen der austretende und der eintretende Str. von einander abweichen, ist die prismatische Ablenkung. Für dieselbe bestehen folgende Gesetze:

1. Die prismatische Ablenkung eines Lichtstrahles ist gleich der Summe der Ablenkungen an beiden brechenden Flächen, $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$.

2. Die Summe der zwei im Prisma befindlichen Strahlenwinkel ist constant gleich dem brechenden Winkel des Prismas, $B = \beta + \beta'$.

3. Die prismatische Ablenkung ist gleich der Summe des Einfalls- und des Austrittswinkels, vermindert um den brechenden Winkel, $A = \alpha + \alpha' - B$.

4. Das Minimum der Ablenkung findet statt, wenn der Einfalls- und der Austrittswinkel einander gleich sind (symmetrischer Durchgang).

Beweis. A ist der Außenwinkel eines Dreiecks, dessen innere Nichtnebenwinkel $\alpha - \beta$ und $\alpha' - \beta'$ sind, daher ist $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$ (Beweis von 1.). Durch veränderte Buchstabenstellung ist $A = \alpha + \alpha' - (\beta + \beta'$. Da nun $\beta + \beta'$ ebensowohl wie B das Supplement von m bildet, so ist $\beta + \beta' = B$ (Beweis zu 2.), woraus durch Einsetzung entsteht $A = \alpha + \alpha' - B$ (Beweis zu 3.).

Den viel besprochenen Beweis für das Minimum der Ablenkung führen wir nach Stoll (Progr. des Gymn. zu Bensheim 1873). Idee des Beweises: Die Ablenkung A hat nach 3. ihren kleinsten Werth, wenn die Summe $\alpha + \alpha'$ ein Minimum ist; die Be-

so streift der gebrochene Str. gerade über die Grenzfläche hin; wird der Einfallswinkel noch größer, so wird der Sinus des Brechungswinkels größer als 1, was unmöglich ist; d. h. die Str. gehen nicht in das dünnere Medium über, sie werden an der Grenzfläche sämmtlich in das dichtere Medium reflectirt; folglich bildet der Einfallswinkel, dessen Sinus = n ist, den Grenzwinkel der totalen Reflexion. Für den Uebergang aus Wasser in Luft ist n = 3/4, also der Grenzwinkel = 48° 35′; für Alkohol ist derselbe = 47°, für Benzol 42°, für Crownglas 41°, für Flintglas 38°, für Schwefelkohlenstoff 37°, für Diamant 24°.

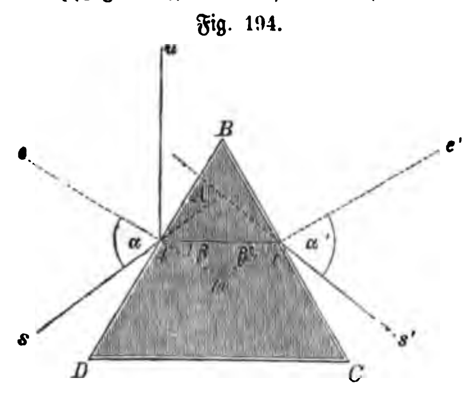
Weil bei der totalen Refl. kein Lichtverlust durch Absorption oder durchgehendes Licht entsteht, so erzeugt dieselbe den lebhaftesten Glanz. Ein halb mit Wasser gefülltes und in Wasser getauchtes Probirgläschen glänzt an dem nicht gefüllten Theile wie Quecksilber; Luftblasen in Wasser glänzen wie Perlen, Sprünge in durchsichtigen Körpern glänzen wie Silberstreifen, weil hier bei dem Uebergange in die Luft der Blase oder der Sprünge die schiefen Str. sämmtlich reflectirt werden. Auch der Glanz von durchsichtigen, mit ebenen Flächen versehenen Körpern, wie z. B. der Stücke von Glaslüstern, rührt von der totalen Reflexion her; dieser Glanz tritt um so leichter und häufiger ein, je kleiner der Grenzwinkel ist; Diamant glänzt daher am stärksten. Ein Papierstreifen, den man auf die Seitenfläche eines gefüllten Glasgefäßes nahe unter den Wasserspiegel klebt, ist von manchen Stellen von oben unsichtbar, kann aber von unten, wenn man gegen den Wasserspiegel blickt, oberhalb desselben gesehen werden. Wenn ein viereckiges Blechkästchen oben halb geschlossen ist, so verschwindet ein dreieckiges Glasfensterchen, das ziemlich nahe unter der Decke angebracht ist, für ein von oben hereinblickendes Auge vollständig, wenn man das Kästchen mit Wasser füllt; dagegen erscheint es durch ein tieferes Glasfensterchen in der gegenüberliegenden Wand gesehen hoch über dem Wasserspiegel. — Benzol bildet auf Wasser eine glitzernde, Wasser auf Schwefelkohlenstoff eine kaum wahrnehmbare Grenzfläche. — Kleine Theile durchsichtiger Körper geben eine undurchsichtige Masse, wenn sie mit einem Stoffe gemengt sind, gegen welchen sie totale Refl. besitzen. Gepulverter Bergkrystall gibt weißen Sand, Schaum besteht aus lauter durchsichtigen Häutchen, ist aber undurchsichtig, gestoßenes Glas gibt weißes Pulver, Schnee und Wolken erscheinen weiß trotz der farblosen Durchsichtigkeit ihrer Theilchen u. s. w.; in allen solchen Fällen muß das Licht oft aus dem dichten Medium in die dünne, die Zwischenräume erfüllende Luft übergehen, wobei es total reflectirt wird; werden dagegen die Zwischenräume mit einer gleich stark lichtbrechenden Flüssigkeit, also z. B. mit einem klaren Oele erfüllt, so hört der Grund der Undurchsichtigkeit auf; dann erscheint Glaspulver, weißer Sand, ein durch Rauhigkeit der Oberfläche undurchsichtiger Edelstein wieder durchsichtig; hierauf beruht wohl auch das Durchsichtigwerden von Hydrophan in Wasser. Manche erklären die Undurchsichtigkeit überhaupt für eine Wirkung der totalen Reflexion. — An den Aquarien hat man Gelegenheit, die schöne Wirkung der totalen Refl. zu beobachten. — Ein unter Wasser befindliches Auge sieht die außerhalb des Wassers liegenden Gegenstände blos innerhalb eines Kreises, dessen Dm. dem Auge unter dem Grenzwinkel 48° erscheint.

Die totale Refl. hat Anwendung in der Camera lucida von Wollaston (1812). Dieselbe besteht aus einem vierseitigen Prisma, von welchem zwei Seiten auf einander senkrecht und die zwei anderen unter 135° geneigt sind. Die eine senkrechte Seite ist den zu spiegelnden Gegenständen, die andere dem Auge zugewendet, das zugleich unter dem Prisma eine weiße Papierfläche und einen durch die Hand auf derselben geführten Zeichenstift erkennen kann. Die Str. der Gegenstände dringen ungebrochen durch die erste senkrechte Fläche und treffen auf die zwei schiefen Flächen in sehr schiefer Lage, werden also total reflectirt und durch die zweite senkrechte Fläche ungebrochen ins Auge gelenkt. Das Auge sieht also die Bilder der Gegenstände auf dem Papier, und die Hand kann deßhalb dieselben fixiren. In der natürlichen Magie hat die totale Refl. an stumpfwinkligen Prismen Verwendung zu optischen Verwandlungen und zu zauberhaftem Verschwinden gefunden; indessen werden solche spiegelnden Prismen auch in mathematischen und physikalischen Präcisions-Instrumenten statt der leicht verderbenden Metallspiegel angewendet, sowie insbesondere in Leuchtthürmen, um alles nach den Seiten und nach rückwärts strahlende Licht vorwärts zu werfen. — Die totale Reflexion erklärt auch die Luftspiegelung, die Erscheinung, daß man in heißen Sandgegenden unterhalb von hochgelegenen Gegenständen ein Bild derselben wie unter einer Wasserfläche erblickt, sowie daß auf dem Meere manchmal ein umgekehrtes und über demselben wohl auch wieder ein directes Bild eines Schiffes erscheint. Bei großer Ruhe der Luft in heißen Sandgegenden kann es nämlich vorkommen, daß tiefer gelegene, heiße Luftschichten für kurze Zeit leichter und dünner sind als höhere; dann können die Str. eines fernen, höheren Gegenstandes diese dünneren Luftschichten in einer den Grenzwinkel übersteigenden Richtung treffen und dadurch total reflectirt werden; da die auftreffenden Str. absteigend waren, so müssen die reflectirten Str. aufsteigen, müssen also den Eindruck eines tiefer liegenden Bildes hervorrufen, wenn sie in ein Auge gelangen. (Monge auf Napoleons Zug nach Aegypten, 1798). — Umgekehrt kann auch, und besonders auf kalten Meeren, die tiefste Luftschicht viel dichter sein als die nächst höheren; es können dann auf-

steigende Str. tiefer liegender Gegenstände sehr schief auf den höheren dünneren Schichten eintreffen und von diesen durch totale Refl. absteigend gemacht werden und daher ein höher liegendes Bild erzeugen. Scoresby beobachtete derartige Erscheinungen häufig in den Polarmeeren. Manche Fata Morgana und Kimmung mag ebenfalls auf Luftspiegelung beruhen.

300 **Brechung des Lichtes durch Prismen.** Unter einem Prisma versteht man in der Optik jede Einrichtung, mittels welcher ein Strahl durch einen Körper mit zwei gegen einander geneigten Flächen geht. Die häufigsten Prismen sind dreiseitig geschliffene Glasprismen; doch hat man auch solche von durchsichtigen Steinen und von Flüssigkeiten; die letzteren erhält man durch gefüllte, dreiseitig aus planparallelen Glastafeln zusammengesetzte Gefäße. Die Gerade, in welcher die Eintritts- und die Austrittsfläche eines durch ein Prisma gehenden Strahles sich schneiden, ist die *brechende Kante*, der Winkel dieser beiden Flächen an dieser Kante ist der brechende Winkel. Eine Ebene, die man senkrecht zur brechenden Kante durch ein Prisma legt, bildet eine Figur, die man Hauptschnitt nennt; für ein dreiseitiges, gleichseitiges Prisma ist der Hauptschnitt ein gleichseitiges Dreieck DBC (Fig. 194), in welchem der Punkt B die brechende Kante darstellt und der Winkel B den brechenden Winkel.

Fig. 194.



Durch ein solches Prisma erfährt ein Lichtstrahl st eine starke Ablenkung; denn schon bei dem Eintritte zu dem Lothe et der Eintrittsfläche gebrochen, gelangt er dann zu der Austrittsfläche, deren Loth e't' nicht mit dem ersten Lothe zusammenfällt, sondern mit demselben einen Winkel m, gleich dem Supplement des brechenden Winkels B einschließt; von diesem Lothe wird der Strahl nun bei dem Austritte noch weggebrochen; daher weicht der austretende Strahl t's' stark in der Richtung von dem eintretenden ab. Ein Gegenstand erscheint durch ein Prisma gesehen an einer ganz anderen Stelle, und zwar geschieht die Verrückung immer nach derjenigen Richtung hin, in welcher die brechende Kante liegt, wie aus der Figur leicht zu ersehen ist. Der Winkel A, um welchen der austretende und der eintretende Str. von einander abweichen, ist die *prismatische Ablenkung*. Für dieselbe bestehen folgende Gesetze:

1. Die prismatische Ablenkung eines Lichtstrahles ist gleich der Summe der Ablenkungen an beiden brechenden Flächen, $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$.

2. Die Summe der zwei im Prisma befindlichen Strahlenwinkel ist constant gleich dem brechenden Winkel des Prismas, $B = \beta + \beta'$.

3. Die prismatische Ablenkung ist gleich der Summe des Einfalls- und des Austrittswinkels, vermindert um den brechenden Winkel, $A = \alpha + \alpha' - B$.

4. *Das Minimum der Ablenkung findet statt, wenn der Einfalls- und der Austrittswinkel einander gleich sind* (symmetrischer Durchgang).

Beweis. A ist der Außenwinkel eines Dreiecks, dessen innere Nichtnebenwinkel $\alpha - \beta$ und $\alpha' - \beta'$ sind, daher ist $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$ (Beweis von 1.). Durch veränderte Buchstabenstellung ist $A = \alpha + \alpha' - (\beta + \beta'$. Da nun $\beta + \beta'$ ebensowohl wie B das Supplement von m bildet, so ist $\beta + \beta' = B$ (Beweis zu 2.), woraus durch Einsetzung entsteht $A = \alpha + \alpha' - B$ (Beweis zu 3.).

Den viel besprochenen Beweis für das Minimum der Ablenkung führen wir nach Stoll (Progr. des Gymn. zu Bensheim 1873). *Idee des Beweises:* Die Ablenkung A hat nach 3. ihren kleinsten Werth, wenn die Summe $\alpha + \alpha'$ ein Minimum ist; die Be-

dingung, unter welcher dieser Fall eintritt, läßt sich unter anderen dadurch ermitteln, daß man $\sin^2 {}^1/_2 (\alpha + \alpha')$ als Function von $\sin^2 {}^1/_2 (\alpha - \alpha')$ darstellt. — **Ausführung des Beweises.** Nach dem Brechungsgesetze ist $\sin\alpha = n \sin\beta$ und $\sin\alpha' = n \sin\beta'$. Verbindet man diese 2 Gl. sowohl durch Addition als durch Subtraction, so ergibt sich durch Anwendung der Formeln für die Summe und die Differenz zweier Sinusse:

$$1)\ \sin {}^1/_2 (\alpha+\alpha') \cos {}^1/_2 (\alpha-\alpha') = n \sin {}^1/_2 (\beta+\beta') \cos {}^1/_2 (\beta-\beta') = n \sin {}^1/_2 B \cos {}^1/_2 (\beta-\beta')$$

$$2)\ \cos {}^1/_2 (\alpha+\alpha') \sin {}^1/_2 (\alpha-\alpha') = n \cos {}^1/_2 (\beta+\beta') \sin {}^1/_2 (\beta-\beta') = n \cos {}^1/_2 B \sin {}^1/_2 (\beta-\beta')$$

Multiplicirt man beide Seiten von 1) mit $\cos {}^1/_2 B$, diejenigen von 2) mit $\sin {}^1/_2 B$, quadrirt und addirt die neuen Gl., so erhält man:

$$[\sin {}^1/_2 (\alpha+\alpha') \cos {}^1/_2 (\alpha-\alpha') \cos {}^1/_2 B]^2 + [\cos {}^1/_2 (\alpha+\alpha') \sin {}^1/_2 (\alpha-\alpha') \sin {}^1/_2 B]^2 = [n \sin {}^1/_2 B \cos {}^1/_2 B]^2.$$

Setzt man $\cos^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha') = 1 - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha')$ und vereinigt die Glieder mit $\sin^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha')$, so wird:

$$\sin^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha') [\cos^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha') \cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha') \sin^2 {}^1/_2 B] = \sin^2 {}^1/_2 B [n^2 \cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha')].$$

Wenn jetzt auch $\cos^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha') = 1 - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha')$ gesetzt wird, so entsteht:

$$\sin^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha') [\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha')] = \sin^2 {}^1/_2 B \{[\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha')] - (n^2-1) \cos^2 {}^1/_2 B\},$$

woraus $\sin^2 {}^1/_2 (\alpha+\alpha') = \sin^2 {}^1/_2 B \left\{ 1 + \dfrac{(n^2-1) \cos^2 {}^1/_2 B}{\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2 (\alpha-\alpha')} \right\}$.

Die rechte Seite dieser Gl. wird ein Minimum, wenn $\alpha = \alpha'$; unter der gleichen Voraussetzung tritt daher auch das Min. der Ablenkung ein. Zeichnet man diesen Specialwerth des Winkels α, so wie die anderen entsprechenden Größen durch den Inder 0 aus, so ist

$$A_0 = 2\alpha_0 - B;\ B = 2\beta_0 \text{ und } n = \sin \alpha_0 / \sin \beta_0 = \sin {}^1/_2 (A_0 + B) / \sin {}^1/_2 B.$$

Der letzte Ausdruck ist von besonderer Wichtigkeit, da er zur Bestimmung des Brechungserponenten dient.

Den Weg eines Str. durch ein Prisma ergibt folgende von Radau (1863) aufgefundene geom. Constr. In Fig. 195 ist B der brechende Winkel und a die Eintrittsstelle des Str. Man beschreibe um a als Mittelpunkt zwei concentrische Kreislinien, deren Radien sich wie die Lichtgeschw. in beiden Medien verhalten, so daß $R : r = c_1 : c_2 = n : 1$; sodann verlängere man den einfallenden Str., bis er die kleinere Kreislinie in b trifft, fällt von b auf die erste brechende Fläche das Loth bc, das rückwärts verlängert die größere Kreislinie in d trifft, so ist nach Reusch (298.) ad die Richtung und ae der Weg des gebrochenen Str. Fällt man nun aus d auf die zweite brechende Fläche das Loth df, das rückwärts verlängert die kleinere Kreislinie in g trifft, so ist ag die Richtung des austretenden Str., welcher mithin selbst erhalten wird,

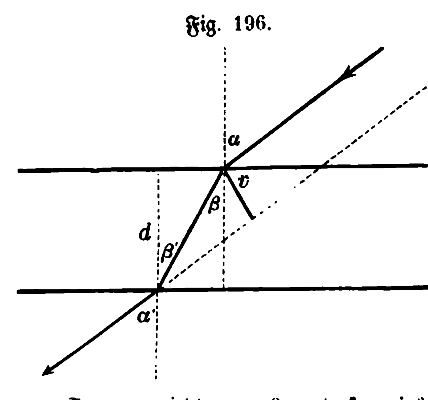
Fig. 195.

wenn man durch e eine Parallele zu ag zieht; denn $\sin\alpha'$ (bei g) ist $ah : ag = ah : r$ und $\sin\beta'$ (bei d) ist $ah : ad = ah : R$; daher $\sin\alpha' : \sin\beta' = (ah : r) / (ah : R) = R : r = c_1 : c_2 = n$. Auch hier ist leicht ersichtlich, daß $B = \beta + \beta'$, da $B = bdg$ ist, und daß die prismatische Ablenkung $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$, da $A = bag = bad + dag$ ist. — Wählt man ag parallel zu fe und bestimmt hiernach die anderen Punkte f, d, c, b, a, so erhält man durch Construction den kleinsten Einfallswinkel α, für welchen noch ein Austritt des Str. aus dem Prisma möglich ist.

Es findet nämlich nicht in allen Fällen ein Durchgang des Str. durch das Prisma statt und zwar dann nicht, wenn der Einfallswinkel des Str. an der Austrittsfläche den Grenzwinkel der totalen Refl. übertrifft; in diesem Falle wird der Str. an der Austrittsfläche total reflectirt, wie z. B. bei der Camera lucida. Es sei nämlich dieser Grenzwinkel $= g$, so darf höchstens sein $\beta + g = B$ oder $\beta = B - g$. Wäre nun $B = 2g$, so müßte

$\beta = g$ werden; nun wird aber der Brechungswinkel beim Eintritte in ein dichteres Medium niemals so groß, wie der Grenzwinkel für den Austritt aus demselben; folglich muß $\beta < g$, also auch $B < 2g$ sein. Der Durchgang von Strahlen durch ein Prisma findet nicht statt, wenn der brechende Winkel desselben gleich oder größer ist als der doppelte Grenzwinkel der totalen Reflexion; es findet dann an der Austrittsfläche totale Reflexion statt. Werden diese total reflectirten Strahlen durch die dritte Prismenfläche hinausgeleitet, so sieht man von dieser aus ein umgekehrtes Bild der Gegenstände; dieses Bild ist rein von Farben, wenn der Austritt senkrecht geschieht, wenn also das Prisma gleichschenklig rechtwinklig ist; um dieses Bild nicht durch andere Bilder zu trüben, bedeckt man die spiegelnde Hypotenusenfläche mit einem Rußanstrich. – Es gibt auch Fälle, in welchen der brechende Winkel sogar kleiner sein muß als der einfache Grenzwinkel. Fällt z. B. der Strahl senkrecht durch die eine Fläche eines Prismas, so ist sein Einfallswinkel gegen die zweite Fläche gerade gleich dem brechenden Winkel; folglich muß der brechende Winkel kleiner als der Grenzwinkel sein, um einen Durchgang des senkrecht auffallenden Strahles durch das Prisma zu gestatten. Aehnlich ist es, wenn der Strahl eine Richtung zwischen dem Lothe und der brechenden Kante einschlägt, wie z. B. der Strahl ut (Fig. 194). — Betrachtet man durch ein Prisma einen schmalen Gegenstand von einiger Länge, wie z. B. eine Fensterrippe, so erscheint das Bild gebogen; denn die Einfallsebenen vieler Strahlen sind dann nicht senkrecht zur Achse, fallen also nicht in den Hauptschnitt, sondern in andere Schnitte des Prismas. Für diese ist aber der brechende Winkel B kleiner und daher die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B$ stärker.

Fig. 196.



Von Interesse sind einige Berechnungen Bauers, da sich aus denselben über den scheinbaren Ort eines jenseits und innerhalb eines dichteren Mediums befindlichen Körpers Zahlenresultate ergaben, welche frühere unbestimmte Angaben präcisirten. Die erste Rechnung (1867) bezieht sich auf die **Verschiebung eines Lichtstrahles durch eine planparallele Platte** (298. 7). Für eine solche Platte (Fig. 196) ist $\beta' = \beta$ (strengenommen $= -\beta$), so daß $B = \beta + \beta' = 0$, und $\alpha' = \alpha$ (strenggenommen $= -\alpha$), so daß die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B = 0$. Die Verschiebung, d. i. der senkrechte Abstand v der Richtung des austretenden von der des eintretenden Strahles ist $v = (d / \cos \beta') \cdot \sin (\alpha' - \beta') = (d / \cos \beta) \cdot \sin (\alpha - \beta) = d \sin \alpha (1 - \cos \alpha / n \cos \beta) = d \sin \beta (n - \cos \alpha / \cos \beta)$.

Setzt man jetzt $n \cos \beta = \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)} = \sqrt{[n^2 \cos^2\alpha + (n^2 - 1) \sin^2\alpha]}$ und
$\cos \alpha = \sqrt{(1 - n^2 \sin^2\beta)} = \sqrt{[\cos^2\beta - (n^2 - 1) \sin^2\beta]}$, so wird
$v = d \sin \alpha \{1 - 1 / \sqrt{[n^2 + (n^2 - 1) \tan^2 \alpha]}\} = d \sin \beta \{n - \sqrt{[1 - (n^2 - 1) \tan^2 \beta]}\}$.

Hieraus ist klar zu erkennen, daß v gleichzeitig mit d, α, β und n wächst. Tritt der Strahl streifend ein und aus, so wird die Verschiebung selbstverständlich gleich der Dicke der Platte; die erhaltenen Formeln geben gleichfalls diese Maximalverschiebung durch die Substitution: $\alpha = 90^0$, $\beta = g$ (Grenzwinkel der totalen Reflexion), wobei zu beachten, daß $\sin g = 1 / n$ und $\tan g = 1 / \sqrt{(n^2 - 1)}$.

Die zweite Berechnung (1874) bezieht sich auf die Verschiebung eines Körpers, der sich im Inneren eines durchsichtigen Mediums, z. B. in Wasser befindet. Die Rechnung kann mit elementaren Mitteln nicht stattfinden; wir wollen daher nur die Resultate anführen. Ist der wirkliche Abstand des leuchtenden Punktes von der Grenzfläche der beiden Medien = h, so ist der scheinbare Abstand $x = (h / n) \{1 - (n^2 - 1) \tan^2 \beta\}^{3/2}$, und die dieser Fläche parallele Verschiebung $y = h (n^2 - 1) \tan^3\beta$. Die beiden Verschiebungen sind hiernach direct proportional dem wirklichen Abstande, wachsen beide mit dem Einfallswinkel und dem Brechungsexponenten und zwar sind sie von der Function $n^2 - 1$, die auch in der obigen Rechnung vorkommt und die man brechende Kraft nennt, abhängig. Beide Verschiebungen bewirken eine scheinbare Annäherung des Gegenstandes an das Auge. Befindet sich das Auge senkrecht über der Grenzfläche, so hat β und daher auch jede der beiden Verschiebungen ihren Minimalwerth, die parallele Verschiebung ist = 0, die normale $(1 - {}^1/_n)$ h; befindet sich z. B. ein Auge senkrecht über einem Körper im Wasser, so beträgt die senkrechte Annäherung $^1/_4$ h. Befindet sich das Auge in der Grenzfläche, so finden die Maximalwerthe statt; β ist dann gleich dem Grenzwinkel g der totalen Reflexion, die normale Verschiebung ist = h und die parallele = h tang g. Befindet sich also ein Auge in gleicher Höhe mit

lber auch bei nicht brennbaren Körpern steht der B.-E. durchaus nicht in irgend einem esten Verhältnisse zu der Dichte, Kalkspath bricht stärker als Barytspath, Stickstoff stärker ls Sauerstoff. Der B.-E. ändert sich also sehr unregelmäßig mit der Dichte. Dies findet ber nicht blos für verschiedene Körper, sondern auch für einen und denselben Körper statt. Bird ein Körper erwärmt und dadurch weniger dicht, so nimmt zwar sein B.-E. ab; im llgemeinen nimmt er aber bei steigender Temperatur rascher ab als die Dichtigkeit; doch ibt es auch Fälle, wo die Abnahmen der B.-E. und der Dichtigkeit einander proportional ind, und wo die B.-E. langsamer abnehmen als die Dichtigkeiten. Ebenso wächst bei den Salzlösungen der B.-E. zwar mit der Concentration, aber ohne der Dichtigkeit proportional u sein. Offenbar wächst demnach der B.-E. n mit der Dichte, aber er ist derselben nicht roportional, das Verhältniß $n : d$ ist nicht constant; hierdurch gelangte man zu der Vernuthung, es könnten gewisse Functionen des B.-E. der Dichte proportioal sein. In dem Beweis des 4. Brechungsgesetzes (298.) kommt die Function $n - 1$ vor und die Ablenkung eigt sich derselben proportional; in anderen math. Betrachtungen über Brechung tritt die Function $n^2 - 1$ auf, z. B. in dem Ausdruck über prismatische Ablenkung (300.); man interzog daher diese Ausdrücke eingehenden Forschungen.

Das specifische Brechungsvermögen. Die Molekularrefraction. Arago 302 und Biot untersuchten (1803) die Werthe des Ausdrucks $n^2 - 1$, den sie brechende Kraft nannten, für verschiedene Gase und fanden, daß dieselbe bei einem und demselben Gase der Dichte proportional sei, daß also der Quotient $(n^2 - 1) / d$, die sogenannte spec. brechende Kraft für ein und dasselbe Gas constant, und daß die brechende Kraft eines Gasgemisches leich der Summe der brechenden Kräfte der Bestandtheile sei; allein Dulong hat bald darauf ezeigt, daß die brechenden Kräfte verschiedener Gase in keiner regelmäßigen Beziehung zur Dichte stehen, und daß die brechende Kraft einer chemischen Verbindung nicht gleich der Summe er brechenden Kräfte der Bestandtheile sei. Schrauf stellte von 1860 Untersuchungen über as $n^2 - 1$ für Krystalle an und gelangte auch zu interessanten Ergebnissen, die jedoch nicht veiter verfolgt wurden. Nach dem Vorschlage von Beer wandte man sich deßhalb der schon on Newton beachteten Function $n - 1$ zu, deren Verhältniß zur Dichte d derselbe specifisches Brechungsvermögen genannt hatte; wenn nun auch Rühlmann (1868), Wüllner (1869) und Mascart (1878) kleine Verschiedenheiten wahrgenommen haben, so ergaben doch deren und zahlreiche andere Forschungen, daß das specif. Brechungsvermögen $b = (n - 1) / d$ für inen und denselben Körper nahezu constant ist, also nur von der chemischen Zusammensetzung der Substanz abhängt. Deßhalb wurden besonders eingehende Untersuchungen durch Landolt und Gladstone seit 1864 über das spec. Brechungsvermögen der Atom- und Molekulargewichte (früher Aequivalente) der Körper angestellt, das man erhält, indem man das spec. Brechungsvermögen mit dem Molekulargewicht p multiplicirt; Landolt nannte diese Größe $r = p (n - 1) / d$ Refractionsäquivalent, welcher Ausdruck der modernen Chemie entsprechend neuerdings mit Molekularrefraction vertauscht wurde. Für viele der untersuchten Stoffe fand Landolt folgende Gesetze: 1. Die Molekularrefraction einer Verbindung (chemisch oder mechanisch) ist gleich der Summme derjenigen der Bestandtheile. 2. Isomere Verbindungen haben gleiche Molekularrefraction. 3. Für homologe Reihen entspricht der Zunahme um eine gleiche Atomgruppe eine constante Zunahme der Refraction. Aus dem Gesetz 1. läßt sich das r, also auch das n einer Verbindung berechnen, wenn die r oder n der Bestandtheile bekannt sind; ebenso ist das r eines Bestandtheiles u finden, wenn es für die Verbindung und die anderen Bestandtheile bekannt ist; hierdurch st es möglich geworden, sogar die B.-E. undurchsichtiger Stoffe zu berechnen. Von hervorragendem Interesse werden hierbei die Atomrefractionen r der Elemente; so ist r für $H = 1{,}3$, für $O = 3$, für $C = 5$, für $Cl = 10$, für $J = 25$, für Schwefel $= 16$, für Zinn $= 20$ u. s. w. Aus diesen Atomrefractionen der Elemente lassen sich nun die Molekularrefractionen beliebiger Verbindungen berechnen, und bei entsprechenden Experimenten stellte ich heraus, daß für Säuren, Alkohole, Aetherarten u. s. w. die berechneten Werthe richtig waren, daß also das Landolt-Gladstone'sche Gesetz der Constanz der Brechungsenergie sich ewährte. Jedoch stellten die Untersuchungen Gladstones insbesondere für die ungesättigten Kohlenwasserstoffe und ihre Derivate Abweichungen heraus, welche starke Zweifel an der Richtigkeit des Gesetzes 1. erweckten; so müßte Benzol C_6H_6 ein $r = 36$ haben, während er Versuch 42 ergibt; es entstand daher die Meinung, daß die Art der Atomverkettung inen Einfluß auf die Refraction habe, obwohl bei isomeren Stoffen die verschiedene Atomagerung keine Einwirkung zeigte. Durch Brühls Publicationen (1880) scheinen diese Widersprüche ihrer Lösung näher zu kommen: Wie die Elemente in ihren Verbindungen sich theils inwerthig, theils mehrwerthig, polyvalent verhalten, so haben auch die Elemente von einer Valenz nur eine Atomrefraction, während die polyvalenten Elemente eine mehrfache Atomrefraction annehmen können. So ist die Refraction von Chlor, Brom, Jod unveränderich, während der vierwerthige Kohlenstoff eine wechselnde Refraction besitzt; und zwar ändert sich seine Refraction, wenn vorher einfach gebundene Kohlenstoff-

$\beta = g$ werden; nun wird aber der Brechungswinkel beim Eintritte in ein dichteres Medium niemals so groß, wie der Grenzwinkel für den Austritt aus demselben; folglich muß $\beta < g$, also auch $B < 2g$ sein. Der Durchgang von Strahlen durch ein Prisma findet nicht statt, wenn der brechende Winkel desselben gleich oder größer ist als der doppelte Grenzwinkel der totalen Reflexion; es findet dann an der Austrittsfläche totale Reflexion statt. Werden diese total reflectirten Strahlen durch die dritte Prismenfläche hinausgeleitet, so sieht man von dieser aus ein umgekehrtes Bild der Gegenstände; dieses Bild ist rein von Farben, wenn der Austritt senkrecht geschieht, wenn also das Prisma gleichschenklig rechtwinklig ist; um dieses Bild nicht durch andere Bilder zu trüben, bedeckt man die spiegelnde Hypotenusenfläche mit einem Rußanstrich. — Es gibt auch Fälle, in welchen der brechende Winkel sogar kleiner sein muß als der einfache Grenzwinkel. Fällt z. B. der Strahl senkrecht durch die eine Fläche eines Prismas, so ist sein Einfallswinkel gegen die zweite Fläche gerade gleich dem brechenden Winkel; folglich muß der brechende Winkel kleiner als der Grenzwinkel sein, um einen Durchgang des senkrecht auffallenden Strahles durch das Prisma zu gestatten. Aehnlich ist es, wenn der Strahl eine Richtung zwischen dem Lothe und der brechenden Kante einschlägt, wie z. B. der Strahl nt (Fig. 194). — Betrachtet man durch ein Prisma einen schmalen Gegenstand von einiger Länge, wie z. B. eine Fensterrippe, so erscheint das Bild gebogen; denn die Einfallsebenen vieler Strahlen sind dann nicht senkrecht zur Achse, fallen also nicht in den Hauptschnitt, sondern in andere Schnitte des Prismas. Für diese ist aber der brechende Winkel B kleiner und daher die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B$ stärker.

Fig. 196.

Von Interesse sind einige Berechnungen Bauers, da sich aus denselben über den scheinbaren Ort eines jenseits und innerhalb eines dichteren Mediums befindlichen Körpers Zahlenresultate ergaben, welche frühere unbestimmte Angaben präcisirten. Die erste Rechnung (1867) bezieht sich auf die Verschiebung eines Lichtstrahles durch eine planparallele Platte (298. 7). Für eine solche Platte (Fig. 196) ist $\beta' = \beta$ (strengenommen $= -\beta$), so daß $B = \beta + \beta' = 0$, und $\alpha' = \alpha$ (strenggenommen $= -\alpha$), so daß die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B = 0$. Die Verschiebung, d. i. der senkrechte Abstand v der Richtung des austretenden von der des eintretenden Strahles ist $v = (d / \cos \beta') \,.\, \sin (\alpha' - \beta') = (d / \cos \beta) \,.\, \sin (\alpha - \beta) = d \sin \alpha (1 - \cos \alpha / n \cos \beta) = d \sin \beta (n - \cos \alpha / \cos \beta)$

Setzt man jetzt $n \cos \beta = \sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)} = \sqrt{[n^2 \cos^2 \alpha + (n^2 - 1) \sin^2 \alpha]}$ und
$\cos \alpha = \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \beta)} = \sqrt{[\cos^2 \beta - (n^2 - 1) \sin^2 \beta]}$, so wird
$$v = d \sin \alpha \{1 - 1 / \sqrt{[n^2 + (n^2 - 1) \operatorname{tang}^2 \alpha]}\} = d \sin \beta \{n - \sqrt{[1 - (n^2 - 1) \operatorname{tang}^2 \beta]}\}.$$

Hieraus ist klar zu erkennen, daß v gleichzeitig mit d, α, β und n wächst. Tritt der Strahl streifend ein und aus, so wird die Verschiebung selbstverständlich gleich der Dicke der Platte; die erhaltenen Formeln geben gleichfalls diese Maximalverschiebung durch die Substitution: $\alpha = 90^0$, $\beta = g$ (Grenzwinkel der totalen Reflexion), wobei zu beachten, daß $\sin g = 1 / n$ und $\operatorname{tang} g = 1 / \sqrt{(n^2 - 1)}$.

Die zweite Berechnung (1874) bezieht sich auf die Verschiebung eines Körpers, der sich im Inneren eines durchsichtigen Mediums, z. B. in Wasser befindet. Die Rechnung kann mit elementaren Mitteln nicht stattfinden; wir wollen daher nur die Resultate anführen. Ist der wirkliche Abstand des leuchtenden Punktes von der Grenzfläche der beiden Medien $= h$, so ist der scheinbare Abstand $x = (h / n) \{1 - (n^2 - 1) \operatorname{tang}^2 \beta\}^{3/2}$, und die dieser Fläche parallele Verschiebung $y = h (n^2 - 1) \operatorname{tang}^3 \beta$. Die beiden Verschiebungen sind hiernach direct proportional dem wirklichen Abstande, wachsen beide mit dem Einfallswinkel und dem Brechungsexponenten und zwar sind sie von der Function $n^2 - 1$, die auch in der obigen Rechnung vorkommt und die man brechende Kraft nennt, abhängig. Beide Verschiebungen bewirken eine scheinbare Annäherung des Gegenstandes an das Auge. Befindet sich das Auge senkrecht über der Grenzfläche, so hat β und daher auch jede der beiden Verschiebungen ihren Minimalwerth, die parallele Verschiebung ist $= 0$, die normale $(1 - 1/n)\, h$; befindet sich z. B. ein Auge senkrecht über einem Körper im Wasser, so beträgt die senkrechte Annäherung $1/4$ h. Befindet sich das Auge in der Grenzfläche, so finden die Maximalwerthe statt; β ist dann gleich dem Grenzwinkel g der totalen Reflexion, die normale Verschiebung ist $= h$ und die parallele $= h \operatorname{tang} g$. Befindet sich also ein Auge in gleicher Höhe mit

einer Wasseroberfläche, so erscheint jeder tiefere Gegenstand ebenfalls in derselben und zwar an der genäherten Stelle, an welcher der Strahl unter dem Grenzwinkel einfällt.

Bestimmung des Brechungsexponenten (Fraunhofer 1814). Der Brechungsexponent ist eine der wichtigsten Größen der Physik; nicht blos deßhalb, weil er ein ungefähres Maß der Stärke der Brechung ist, sondern auch, weil er in die meisten optischen Berechnungen eintritt z. B. bei der Berechnung der Brennweite der Linsen. Seine genaue Bestimmung gehört daher zu den Hauptaufgaben der Physik; dieselbe kann z. B. geschehen mittels der Brechung des Lichtes durch ein Prisma; denn für den Fall der kleinsten Ablenkung fanden wir in 300. 301

$$n = \sin {}^1/_2 (A_0 + B) / \sin {}^1/_2 B.$$

Nach dieser Fl. ist es möglich, den Brechungsexp. n für einen Körper zu bestimmen, wenn man denselben in prismatische Form bringen, den brechenden Winkel B des Prismas und das Minimum der Ablenkung A_0 eines Lichtstr. messen kann.

Flüssige Körper lassen sich leicht in prismatische Form bringen, indem man sie in ein prismatisches Gefäß aus planparallelen Glasplatten gebildet, einfüllt. Feste Körper haben häufig von Natur prismatische Gestalt oder lassen sich in dieselbe zuschleifen; sind sie dafür zu kostbar wie z. B. Edelsteine, so bringt man sie in ein flüssiges Prisma und mischt demselben so lange eine andere Flüssigkeit zu, bis die Mischung denselben Brechungsexp. hat wie der feste Körper, was man daran erkennt, daß der feste Körper in der Flüssigkeit verschwindet; für Edelsteine benutzt man z. B. Olivenöl, dem man allmälig Cassia- oder Sassafras-Oel zumischt, weil diese Oele einen sehr hohen Exp. haben; hierdurch kann man beiläufig gesagt, auch falsche Diamanten von echten unterscheiden. Auch luftförmige Körper füllt man in prismatische Glasgefäße oder in weite Röhren, deren Enden schief gegen einander abgeschliffen und durch Glasplatten geschlossen sind. — Den brechenden Winkel der Prismen mißt man mittels des Anlege-Goniometers oder mittels Wollastons Reflexionsgoniometer. Das Minimum der Ablenkung maß Fraunhofer mittels eines Theodolits, vor dessen Fernrohr eine drehbare Scheibe angebracht war zum Aufstellen und Drehen des Prismas. Zuerst wurde das Fernrohr so gestellt, daß der Str. das Fadenkreuz traf; dann wurde das Prisma auf die Scheibe gebracht, und diese und das Fernrohr so lange gedreht, bis der Str. wieder auf das Fadenkreuz fiel und am wenigsten von der ursprünglichen Lage abgelenkt erschien. Da indeß bei dem Gange durch das Prisma der Str. in seine Farben zerlegt wird und dadurch in einen breiten Farbenstreifen, in ein Spectrum, ausgebreitet ist, so muß das Fernrohr auf eine bestimmte Stelle des Spectrums gerichtet werden; die gewöhnlichen mittleren Angaben beziehen sich auf den gelben Theil des Spectrums, die genauen auf ganz bestimmte, scharfe dunkle Linien desselben, die wir später noch betrachten werden. Genauer und bequemer können diese Messungen mit Babinets Goniometer und mit Meyersteins Spectrometer vorgenommen werden, weil bei diesen Apparaten das Prisma unabhängig von dem Fernrohre in der Mitte des getheilten Kreises drehbar aufgestellt ist. Meyerstein gab (1856) eine zweite, mit seinem Spectrometer ausführbare Methode an, bei welcher der Str. senkrecht zur Austrittsfläche aus einem Prisma kommt; es findet dann nur an der Eintrittsfläche eine Ablenkung statt, deren Brechungswinkel β gleich dem brechenden Winkel B des Prismas ist, während der Einfallswinkel α gleich A + B sein muß, so daß $n = \sin(A + B) / \sin B$ wird. Wegen der steigenden Bedeutung der Brechungsexp., die man bis in die sechste Decimale genau zu ermitteln sucht, wurden in den letzten Jahren die Methoden noch mehr vervollkommnet. V. v. Lang (1878) construirte ein zuverlässiges und einfacher zu handhabendes Spectrometer, und mehrere Forscher suchten die alte Methode von Wollaston (1802) zu praktischer Brauchbarkeit umzuformen; dieselbe beruht (Aufg. 546 bis 48) auf der totalen Refl., da der Sinus des Grenzwinkels derselben bekanntlich gleich dem B.-E. ist, und hat den Vorzug, auch für undurchsichtige Körper und für sehr geringe Mengen brauchbar zu sein. Abbe construirte (1872) sein Refractometer, bestehend aus 2 aneinander gelegten Prismen, zwischen denen sich der total reflectirende Tropfen der zu untersuchenden Flüssigkeit befindet, und machte dasselbe (1879) auch für feste Körper brauchbar; mittels dieses Apparates bestimmte Matthießen (1877) die B.-E. der Häute und Feuchtigkeiten des Auges. Eilhard Wiedemann gab (1874) folgendes Verfahren für dünne durchsichtige Platten fester Körper: man taucht die Platte in eine stärker brechende Flüssigkeit und dreht sie so lange, bis das durchgelassene Licht verschwindet; für Flüssigkeiten benutzt man eine Doppelglasplatte mit einer Zwischenschicht aus Luft und dreht sie in der Flüssigkeit, bis das durchgelassene Licht total reflectirt, also die Platte dunkel wird; aus den beobachteten Grenzwinkeln berechnet man leicht den B.-E. Diese Methoden sind nur für durchsichtige Körper anwendbar; Kohlrausch suchte (1878) durch sein Totalreflectometer allgemeine Anwendbarkeit und praktische Einfachheit mit für die Praxis ausreichender Ge-

nauigkeit zu verbinden. In einer Flüssigkeit von größerem B.-E. (Schwefelkohlenstoff 1,95, Phosphorlösung und Phenylsulfid fast 2) wird der Körper drehbar und mit einer spiegelnden Fläche in der Drehachse aufgehängt; der Moment und die Grenzlinie der totalen Reflexion ist erreicht, wenn und wo der schwache Schimmer der diffusen Reflexion in den hellen Metallglanz der totalen übergeht. Durch Einführung eines Vergleichsprismas machte Soret (1882) diese Methode von dem veränderlichen B.-E. der Flüssigkeit unabhängig und dadurch genauer; auch die Meth. von Wollaston und Abbé wurden von Feußner einer größeren Genauigkeit theilhaftig (1882). — Nach solchen Methoden bestimmt man die B.-E. für den Uebergang aus Luft in andere Körper; wollte man denselben auffinden für den Lichtübergang aus einem beliebigen Körper in einen anderen, so hätte man den leicht zu beweisenden Satz anzuwenden, daß der B.-E. zweier Körper gegen einander gleich dem Quotienten der B.-E. der beiden Körper gegen einen und denselben dritten ist; so ergibt sich z. B. der B.-E. von Wasser gegen Glas $= {}^4/_3 / {}^3/_2 = {}^8/_9$, weil $^4/_3$ und $^3/_2$ die B.-E. von Wasser und Glas gegen Luft sind. Diesen Satz benutzt man auch, um die B.-E. von Körpern gegen den leeren Raum, die sogenannten absoluten B.-E. zu finden; man hat einfach den Exp. des Körpers gegen die Luft mit demjenigen der Luft gegen den leeren Raum zu multipliciren. Folglich ist es von großem Interesse, den B.-E. der Luft gegen den leeren Raum, den absoluten B.-E. der Luft zu bestimmen. Derselbe ist bei 0° und 76^{cm} Luftdruck = 1,000294, welche Zahl sowohl von Arago und Biot (1806) aus physikalischen Rechnungen, wie auch von Delambre aus der astronomischen Refraction gefunden wurde. Die folgende Tabelle enthält die nach den angegebenen Methoden aufgesuchten B.-E. fester und flüssiger Körper gegen die Luft und die absoluten B.-E. von Gasen:

Bleichromat	2,926	Steinöl	1,544
Anatas	2,508	Sassafrasöl	1,536
Diamant	2,487	Leinöl	1,485
Zinkblende	2,260	Naphta	1,475
Phosphor	2,224	Olivenöl	1,469
Schwefel	2,040	Schwefelsäure	1,440
Flintglas	2—1,6	Salpetersäure	1,410
Calomel	1,970	Salzsäure	1,401
Wismuthnitrat	1,890	Salmiaklösung	1,393
Granat	1,815	Kalilauge	1,390
Rubin	1,779	Kochsalzlösung	1,375
Saphir	1,768	Weingeist	1,370
Turmalin	1,668	Rum	1,360
Kalkspath	1,654	Aether	1,358
Barytspath	1,647	Ammoniak	1,349
Topas	1,638	Essig	1,347
Bergkrystall	1,562	Brunnenwasser	1,337
Copal	1.549	Wasser	1,336
Zucker	1,545	— —	
Crownglas	1,540	Cyan	1,000 834
Gemeines Glas	1,530	Chlor	1,000 772
Salpeter	1,514	Elayl	1,000 678
Alaun	1,457	Schwefelkohlenstoff	1,000 644
Augenlinsen	1,384	Stickoxydul	1,000 503
Eis	1,310	Kohlendioxyd	1,000 449
— — —		Sumpfgas	1,000 443
Schwefelkohlenstoff	1,680	Kohlenoxyd	1,000 340
Cassia-Oel	1,640	Stickoxyd	1,000 303
Anis-Oel	1,601	Stickstoff	1,000 300
Tolubalsam	1,628	Atm. Luft	1,000 294
Canadabalsam	1,532	Sauerstoff	1,000 272
Copaivabalsam	1,528	Wasserstoff	1,000 138

Es ist aus dieser Tabelle ersichtlich, wie weit die Brechungsgesetze 5 und 6 gelten. Die Gase haben viel kleinere B.-E. als die Flüssigkeiten, und diese durchschnittlich kleinere als die festen Körper; die festen Körper brechen also das Licht stärker als die flüssigen, und beide sind hierin weit den Luftarten überlegen. Auch hat die leichteste Luftart den kleinsten B.-E., schwere und dichte feste Körper wie die Edelsteine, haben die größten B.-E. Wenn hieraus bei oberflächlicher Betrachtung der Schluß gezogen werden könnte, daß der B.-E. mit der Dichte wachse, so fallen doch sogleich zahlreiche Ausnahmen in's Auge; denn die ganze Reihe der brennbaren Flüssigkeiten, die durchschnittlich leichter als nicht brennbare sind, haben größere B.-E. als diese, und selbst der Spiritus und der Aether überragen hierin das schwere Wasser; ja jene brennbaren Oele brechen sogar stärker als viel dichtere feste Körper.

Aber auch bei nicht brennbaren Körpern steht der B.-E. durchaus nicht in irgend einem festen Verhältnisse zu der Dichte, Kalkspath bricht stärker als Barytspath, Stickstoff stärker als Sauerstoff. Der B.-E. ändert sich also sehr unregelmäßig mit der Dichte. Dies findet aber nicht blos für verschiedene Körper, sondern auch für einen und denselben Körper statt. Wird ein Körper erwärmt und dadurch weniger dicht, so nimmt zwar sein B.-E. ab; im Allgemeinen nimmt er aber bei steigender Temperatur rascher ab als die Dichtigkeit; doch gibt es auch Fälle, wo die Abnahmen der B.-E. und der Dichtigkeit einander proportional sind, und wo die B.-E. langsamer abnehmen als die Dichtigkeiten. Ebenso wächst bei den Salzlösungen der B.-E. zwar mit der Concentration, aber ohne der Dichtigkeit proportional zu sein. Offenbar wächst demnach der B.-E. n mit der Dichte, aber er ist derselben nicht proportional, das Verhältniß $n : d$ ist nicht constant; hierdurch gelangte man zu der Vermuthung, es könnten gewisse Functionen des B.-E. der Dichte proportioal sein. In dem Beweis des 4. Brechungsgesetzes (298.) kommt die Function $n - 1$ vor und die Ablenkung zeigt sich derselben proportional; in anderen math. Betrachtungen über Brechung tritt die Function $n^2 - 1$ auf, z. B. in dem Ausdruck über prismatische Ablenkung (300.); man unterzog daher diese Ausdrücke eingehenden Forschungen.

302 **Das specifische Brechungsvermögen.** Die Molekularrefraction. Arago und Biot untersuchten (1803) die Werthe des Ausdrucks $n^2 - 1$, den sie brechende Kraft nannten, für verschiedene Gase und fanden, daß dieselbe bei einem und demselben Gase der Dichte proportional sei, daß also der Quotient $(n^2 - 1) / d$, die sogenannte spec. brechende Kraft für ein und dasselbe Gas constant, und daß die brechende Kraft eines Gasgemisches gleich der Summe der brechenden Kräfte der Bestandtheile sei; allein Dulong hat bald darauf gezeigt, daß die brechenden Kräfte verschiedener Gase in keiner regelmäßigen Beziehung zur Dichte stehen, und daß die brechende Kraft einer chemischen Verbindung nicht gleich der Summe der brechenden Kräfte der Bestandtheile sei. Schrauf stellte von 1860 Untersuchungen über das $n^2 - 1$ für Krystalle an und gelangte auch zu interessanten Ergebnissen, die jedoch nicht weiter verfolgt wurden. Nach dem Vorschlage von Beer wandte man sich deßhalb der schon von Newton beachteten Function $n - 1$ zu, deren Verhältniß zur Dichte d derselbe specifisches Brechungsvermögen genannt hatte; wenn nun auch Rühlmann (1868), Wüllner (1869) und Mascart (1878) kleine Verschiedenheiten wahrgenommen haben, so ergaben doch deren und zahlreiche andere Forschungen, daß das specif. Brechungsvermögen $b = (n - 1) / d$ für einen und denselben Körper nahezu constant ist, also nur von der chemischen Zusammensetzung der Substanz abhängt. Deßhalb wurden besonders eingehende Untersuchungen durch Landolt und Gladstone seit 1864 über das spec. Brechungsvermögen der Atom- und Molekulargewichte (früher Aequivalente) der Körper angestellt, das man erhält, indem man das spec. Brechungsvermögen mit dem Molekulargewicht p multiplicirt; Landolt nannte diese Größe $r = p (n - 1) / d$ Refractionsäquivalent, welcher Ausdruck der modernen Chemie entsprechend neuerdings mit Molekularrefraction vertauscht wurde. Für viele der untersuchten Stoffe fand Landolt folgende Gesetze: 1. Die Molekularrefraction einer Verbindung (chemisch oder mechanisch) ist gleich der Summme derjenigen der Bestandtheile. 2. Isomere Verbindungen haben gleiche Molekularrefraction. 3. Für homologe Reihen entspricht der Zunahme um eine gleiche Atomgruppe eine constante Zunahme der Refraction. Aus dem Gesetz 1. läßt sich das r, also auch das n einer Verbindung berechnen, wenn die r oder n der Bestandtheile bekannt sind; ebenso ist das r eines Bestandtheiles zu finden, wenn es für die Verbindung und die anderen Bestandtheile bekannt ist; hierdurch ist es möglich geworden, sogar die B.-E. undurchsichtiger Stoffe zu berechnen. Von hervorragendem Interesse werden hierbei die Atomrefractionen r der Elemente; so ist r für $H = 1{,}3$, für $O = 3$, für $C = 5$, für $Cl = 10$, für $J = 25$, für Schwefel $= 16$, für Zinn $= 20$ u. s. w. Aus diesen Atomrefractionen der Elemente lassen sich nun die Molekularrefractionen beliebiger Verbindungen berechnen, und bei entsprechenden Experimenten stellte sich heraus, daß für Säuren, Alkohole, Aetherarten u. s. w. die berechneten Werthe richtig waren, daß also das Landolt-Gladstone'sche Gesetz der Constanz der Brechungsenergie sich bewährte. Jedoch stellten die Untersuchungen Gladstones insbesondere für die ungesättigten Kohlenwasserstoffe und ihre Derivate Abweichungen heraus, welche starke Zweifel an der Richtigkeit des Gesetzes 1. erweckten; so müßte Benzol C_6H_6 ein $r = 36$ haben, während der Versuch 42 ergibt; es entstand daher die Meinung, daß die Art der Atomverkettung einen Einfluß auf die Refraction habe, obwohl bei isomeren Stoffen die verschiedene Atomlagerung keine Einwirkung zeigte. Durch Brühls Publicationen (1880) scheinen diese Widersprüche ihrer Lösung näher zu kommen: Wie die Elemente in ihren Verbindungen sich theils einwerthig, theils mehrwerthig, polyvalent verhalten, so haben auch die Elemente von einer Valenz nur eine Atomrefraction, während die polyvalenten Elemente eine mehrfache Atomrefraction annehmen können. So ist die Refraction von Chlor, Brom, Jod unveränderlich, während der vierwerthige Kohlenstoff eine wechselnde Refraction besitzt; und zwar ändert sich seine Refraction, wenn vorher einfach gebundene Kohlenstoff-

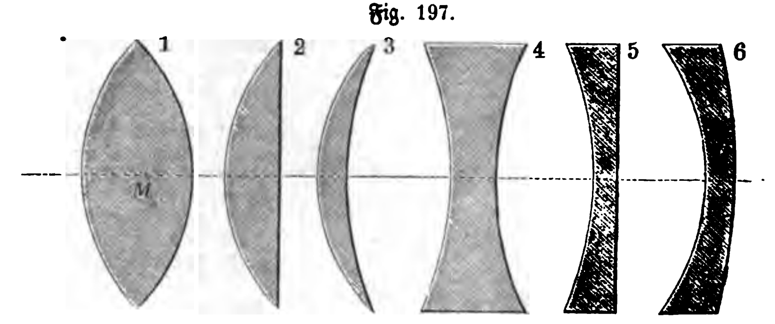
atome sich doppelt binden; sie steigert sich für jedes doppelt gebundene Atompaar um 2. Im Benzol und seinen Derivaten ist die wirkliche Refraction um 6 größer als die theoretisch berechnete; Brühl findet hierin eine Bestätigung der Hypothese von Kekulé, daß im Benzol drei Kohlenatompaare sich doppelt binden, und hält überhaupt die Molekularrefraction in der angeführten Weise für befähigt, über die Art der Atomverkettung und Bindung zu entscheiden; z. B. bei der Doppelbindung zwischen Sauerstoff und Kohlenstoff wird die Refraction vermindert statt vermehrt und zwar ist hier die Verminderung geringer als dort die Vermehrung. Gladstone war schon früher, jedoch aus weniger genauen Versuchen, auf die Polyvalenz der Atomrefr. der Elemente gekommen, für O z. B. 2,76 bis 3,35 für N 4,1 und 5,1, sowie auf die Erhöhung um 2 bei doppelten Bindungen; doch halte die Hypothese nicht Stich bei Körpern von hoher spec. Refr., wie ätherische Oele, Naphthalin u. a. (1881). Nasini und Bernheimer (1883) constatirten die Geltung der Brühl'schen Regel für Styrol und Diamylen, nicht aber für Derivate der Naphthalingruppe, und gelangten zu der Meinung, daß jene Regel nicht genüge.

Landolt aber gab (1883) die Frucht einer mehrjährigen Arbeit, in welcher für zahlreiche Flüssigkeiten und ihre Gemische die Geltung der drei Gesetze, sowie die Beschränkungen derselben, nach den Bestimmungen von Brühl, Hagen und Landolt, nicht bloß für den Ausdruck $(n-1)d$, sondern auch für die Fl. $(n^2-1)/(n^2+1)d$, sowie die Molekular- und Atom-Refraction, in folgender Weise genauer festgestellt wurden: 1. Jeder der beiden Ausdrücke entspricht der Bedingung der Constanz nur annähernd; die n^2-Fl. ergibt bei steigender Temp. zunehmende, die n-Fl. abnehmende Werthe. 2. Die Quotienten der n^2-Fl. ändern sich, wenn die Substanz aus dem flüssigen in den dampfförmigen Zustand übergeht, in weit geringerem Grade als die der n-Fl. Beim Uebergang in den festen Zustand tritt das Entgegengesetzte ein. Innerhalb von Temperaturintervallen bis zu etwa 30° geben für die Flüssigkeiten beide Fln. Werthe, welche auf 3 Decimalen constant sind. 3. Bei der Anwendung auf Mischungen liefert die n^2-Fl. keine genaueren Resultate als die andere; für die optisch-chemische Analyse ist die n-Fl. vorzuziehen. 4. Werden aus den Mol.-Refr. die Atom-Refr. berechnet und hieraus wieder die Mol.-Refr. anderer Verbindungen, so erhält man für beide Fln. befriedigend mit der Erfahrung stimmende Resultate. 5. Die Atom-Refr. des freien C ist nach der n^2-Fl. nicht 5, sondern halb so groß, die des $H = 1$, die des einfach gebundenen O nicht 3, sondern halb so groß, die des doppelt gebundenen O nicht 3,3, sondern 2,3, die des Cl nicht 10, sondern 6, und die Erhöhung der Atom-Refr. von C für jede Doppelbindung beträgt nicht 2, sondern $1^2/_3$. Endlich 6. Die Sätze für Isomeren und homologe Reihen gelten ebensowohl für die n^2-Fl. wie für die n-Fl. Die mehrfach bestrittene Geltung des Gesetzes 2., der Gleichheit des spec. Brechungsvermögens und also auch der Molekularrefraction isomerer Verbindungen hat Gladstone (1881) abermals für viele Körper nachgewiesen; und Brühl zeigte, daß bei solchen Stoffen sich der Siedepunkt, die Transspirationszeit und das Molekularvolumen in derselben regelmäßigen Weise ändern, wie der Brechungsexponent der Dichte proportional bleibt, daß alle diese Constanten von der Atomverkettung und Bindung abhängen, sowie (1882), daß auch die Verbrennungswärme beim Fortschreiten in homologen Reihen in gleichem Sinne, wie die Mol.-Refr. zunehme, und durch Doppelbindungen in analoger Weise vergrößert werde. Ueber feste Körper sind hinsichtlich dieser Constanten noch wenig Forschungen angestellt; Dufet schließt (1879) aus seinen Versuchen, daß Krystalle von Mischungen der isomorphen Sulfate von Nickel und Magnesium dem Gesetz 1. folgen, während Soret (1883) für zahlreiche Alaune fand, daß ihre Brechungsfähigkeit weder dem Molekulargewicht, noch der Dichte prop. sei, jedoch mit der Mendelejeff'schen Theorie in Uebeinstimmung sei.

303 **Brechung des Lichtes durch Linsen.** Ein Prisma geht in eine Linse über, wenn die Richtung einer oder zweier Seitenflächen sich fortwährend und stetig ändert. Es entstehen dann durchsichtige Körper, welche eine oder zwei gekrümmte Seitenflächen haben, und solche Körper nennt man eben Linsen. Man unterscheidet sechs Arten von Linsen, deren Unterschiede leicht an den Durchschnittsformen (Fig. 197) zu erkennen sind: 1. die biconvexe Linse; 2. die planconvexe Linse; 3. die concavconvexe Linse; diese drei Arten nennt man auch Sammellinsen oder Brenngläser; sie sind in der Mitte dicker als am Rande; 4. die biconcave Linse; 5. die planconcave Linse; 6. die convexconcave Linse; diese drei Arten nennt man auch Zerstreuungslinsen; sie sind in der Mitte dünner als am Rande. Die Krümmung der Linsen kann nach jeder beliebigen Curve stattfinden; doch ist für Linsen mit Kugelflächen sowohl die Anfertigung, als auch die Auffindung und die Gestalt

der Gesetze am einfachsten. Eine Gerade, welche von dem geometrischen Mittelpunkte der einen Grenzfläche nach dem der anderen geht oder auf diese senkrecht gefällt wird, heißt Achse der Linse. Fallen die Achsen mehrer Linsen zusammen, so nennt man sie centrirt; eine einzige Linse ist centrirt, wenn die Achse auf

Fig. 197.



einem Grenzkreise senkrecht steht. Der Mittelpunkt **M** des in die Linse fallenden Theiles der Achse wird bei biconvexen und biconcaven Linsen von beiderseits gleicher Krümmung der optische Mittelpunkt genannt; bei solchen Linsen gehen alle durch diesen Punkt gezogenen Strahlen ungebrochen durch, weil diejenigen Flächenelemente, welche ihre Eintritts- und Austrittsfläche bilden, einander parallel sind; solche Strahlen werden Hauptstrahlen genannt; der Hauptstrahl, der in die Achse fällt, geht bei allen Linsen ungebrochen durch. Die anderen Strahlen werden sämmtlich gebrochen und zwar um so mehr, je größer ihr Einfallswinkel ist. Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, vereinigen sich im Allgemeinen nicht wieder in einem Punkte: nur Strahlen, die ringsum gleich gegen die Achse gelagert sind, und solche Strahlen, die nahe bei der Achse auftreffen, werden in einem Punkte vereinigt, erzeugen also ein Bild des Lichtpunktes, von dem sie ausgehen. Den Abstand d des leuchtenden Punktes von der Linse nennt man die Gegenstandsweite, den Abstand b des Bildes die Bildweite. Für diese Abstände gilt folgendes Gesetz:

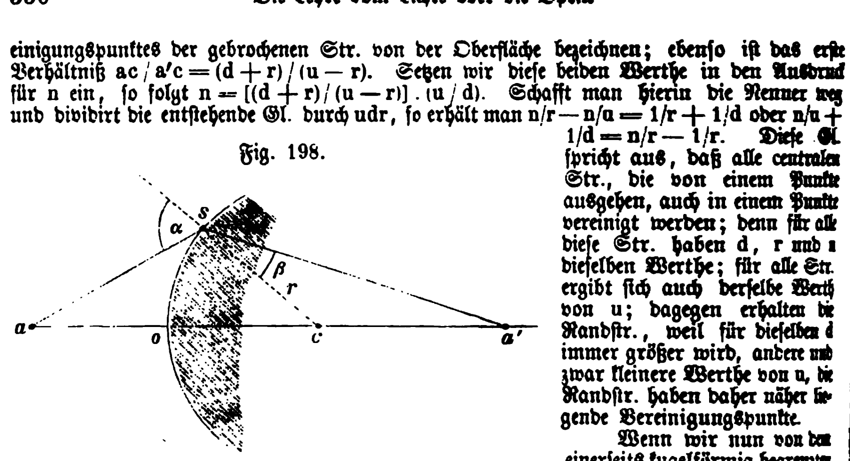
$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = (n - 1)\left\{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (42)$$

Hierin bedeutet n den Brechungsexponent, r und r′ die Radien der beiden Kugelflächen. Das Gesetz wird gewöhnlich in Gestalt der mathematischen Formel ausgedrückt und benutzt; indeß läßt sich dasselbe auch mit Worten aussprechen: Die Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Gegenstandsweite ist gleich der Summe der reciproken Radien multiplicirt mit dem um 1 verminderten Brechungsexponent.

Beweis. Zum Zwecke des Beweises betrachten wir zuerst die Brechung von Str., die in ein durchsichtiges, dichteres Medium mit Kugeloberfläche eindringen (Fig. 198). Wenn c der Mittelpunkt und a der leuchtende Punkt ist, so ist ac die Achse und ein Hauptstrahl; der Strahl as, welcher in der Ebene des Papiers auf die Kugelfläche fällt, wird in derselben Ebene zum Lothe sc gebrochen, kann also die Achse in einem Punkte a′ schneiden. Die Lage dieses Punktes ergibt sich aus folgender Betrachtung: die beiden Winkel α und β stehen bekanntlich in einem gesetzmäßigen Zusammenhange, der durch die Gl. $n = \sin\alpha / \sin\beta$ ausgedrückt ist; für dieselben zwei Winkel lassen sich noch mehr Gl. in den Dreiecken asc und a′sc auffinden; denn $ac : sc = \sin(180 - \alpha) : \sin sac$, woraus $\sin\alpha = (ac / sc) \sin sac$, und ebenso $a'c : sc = \sin\beta : \sin sa'c$, woraus $\sin\beta = (a'c / sc) \sin sa'c$. Durch Division der beiden Werthe und mit Rücksicht auf die erste Gl. ergibt sich $n = (ac / a'c)(\sin sac / \sin sa'c)$. Da nun $\sin sac / \sin sa'c = a's / as$, so ist auch $n = (ac / a'c)(a's / as)$. Machen wir nun die wohl zu beachtende Voraussetzung, daß die Str. nahe bei der Achse auffallen, daß also nur centrale Str., nicht aber die Randstr. durch die Linse gehen können, so ist das letzte Verhältniß $a's / as$ nahezu $= a'o / ao = u / d$, wenn wir mit u die Entf. a′o des Ver-

einigungspunktes der gebrochenen Str. von der Oberfläche bezeichnen; ebenso ist das erste Verhältniß $ac / a'c = (d + r) / (u - r)$. Setzen wir diese beiden Werthe in den Ausdruck für n ein, so folgt $n = [(d + r) / (u - r)] . (u / d)$. Schafft man hierin die Nenner weg und dividirt die entstehende Gl. durch udr, so erhält man $n/r - n/u = 1/r + 1/d$ oder $n/u + 1/d = n/r - 1/r$. Diese Gl. spricht aus, daß alle centralen Str., die von einem Punkte ausgehen, auch in einem Punkte vereinigt werden; denn für alle diese Str. haben d, r und n dieselben Werthe; für alle Str. ergibt sich auch derselbe Werth von u; dagegen erhalten die Randstr., weil für dieselben d immer größer wird, andere und zwar kleinere Werthe von u, die Randstr. haben daher näher liegende Vereinigungspunkte.

Fig. 198.



Wenn wir nun von dem einerseits kugelförmig begrenzten Medium zu der Linse d. i. zu einem beiderseits kugelförmig begrenzten Körper übergehen, so haben wir zu beachten, daß bei dem Austritte der Str. eine abermalige Brechung stattfindet, daß also unsere für u gefundene Gl. abermals zur Geltung kommt, aber mit einigen Modificationen: 1. Die Brechung findet für den Uebergang aus dem dichteren Medium in die Luft statt; also ist $1/n$ für n zu setzen. 2. Die Krümmung der Austrittsfläche kann eine andere sein, und der Radius derselben hat die entgegengesetzte Lage; also ist $-r'$ für r zu setzen. 3. Der Vereinigungspunkt der aus dieser zweiten Fläche tretenden Str. erzeugt das Bild; also ist b für u zu setzen. 4. Die Strahlen, welche auf diese Fläche fallen, kommen nicht von a, sondern fallen so ein, als ob sie von a' kämen, dessen Abstand von der Austrittsfläche $= u - \delta$ ist, wenn δ die Dicke der Linse bedeutet; da aber diese Entfernung in entgegengesetzter Richtung wie d gerechnet wird, so ist $-(u - \delta)$ für d zu setzen, und, wenn wir die Dicke der Linse außer Acht lassen, $-u$ für d. Führen wir diese Substitutionen aus, so erhalten wir die für den Austritt geltende Gleichung $1/bn - 1/u = -1/r'n + 1/r'$. Nehmen wir hieraus den Werth für $1/u$ und setzen denselben in die ebenfalls hier gültige Eintrittsgleichung ein, so ergibt sich $n/bn + n/r'n - n/r' + 1/d = n/r - 1/r$, woraus endlich folgt $1/b + 1/d = n/r + n/r' - 1/r - 1/r'$ oder $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$, was zu beweisen war.

Sind die einfallenden Strahlen einander parallel, so muß in der Formel $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$ die Gegenstandsweite $d = \infty$, also $1/d = 0$ gesetzt werden, wodurch sich ergibt $1/b = (n - 1)(1/r + 1/r')$; die parallelen Strahlen werden also in einem Punkte vereinigt, dessen Entfernung gleich dem reciproken Werthe von $(n - 1)(1/r + 1/r')$ ist; wir nennen auch hier diesen Punkt **Brennpunkt** (F) und seine Entfernung von der Linse **Brennweite** $= f$; führen wir den reciproken Werth derselben an Stelle jenes Ausdruckes in Fl. (42) ein, so nimmt dieselbe ganz genau die Gestalt des speciellen Hohlspiegelgesetzes an $1/b + 1/d = 1/f$, eine bemerkenswerthe Uebereinstimmung.

Um das in 293. mitgetheilte allgemeine Spiegelgesetz I den sphärischen Linsen anzupassen, genügt es, an die Stelle des Krümmungsradius die doppelte Brennweite zu setzen, sowie ferner an die Stelle des Bildes den gleichweit von der Linse entfernten aber auf der entgegengesetzten Seite derselben liegenden Punkt; nennen wir den letzteren das **Gegenbild** des leuchtenden Punktes, so erhält das citirte Gesetz die Form:

Bei jeder sphärischen Linse wird die doppelte Brennweite durch einen in der Achse liegenden leuchtenden Punkt und dessen Gegenbild harmonisch getheilt.

Hierbei muß indessen noch besonders betont werden, daß die doppelte Brennweite bei einer Convexlinse **vor** derselben abzutragen ist, ebenso wie beim Concavspiegel (Fig. 180); bei einer Concavlinse aber **hinter** derselben, ebenso wie beim Convexspiegel (Fig. 183). Dies vorausgesetzt, reicht das obige Gesetz völlig hin, um sich bei einer beliebigen Lage des

leuchtenden Punktes über dessen Convex- oder Concavlinsenbild rasch und sicher zu orientiren: **Man bestimmt zu den Endpunkten der vorschriftsmäßig aufgetragenen doppelten Brennweite und dem gegebenen Object den vierten harmonischen Punkt (Gegenbild) und überträgt diesen in gleiche Entfernung auf die entgegengesetzte Seite der Linse, so hat man das gewünschte Bild gefunden.** Dem Studirenden wird dringend empfohlen, sich durch Constr. verschiedener Fälle von der allgemeinen Brauchbarkeit der Bauer'schen Regel zu überzeugen.

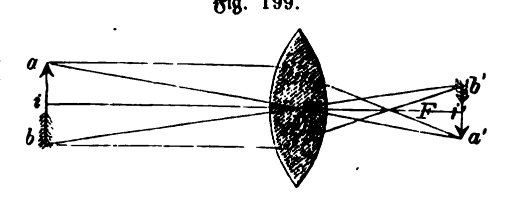
304 **Die Bilder der Convex- oder Sammellinsen. Die sechs Linsenregeln.** 1. Ein unendlich weit entfernter Gegenstand hat ein unendlich kleines Bild auf der anderen Seite der Linse im Brennpunkte.

Denn setzt man in der Fl. $1/b + 1/d = (n-1)(1/r + 1/r')$ die Gegenstandsweite $d = \infty$, so ist $1/b = (n-1)(1/r + 1/r')$; den reciproken Werth von $(n-1)(1/r + 1/r')$ haben wir aber mit f bezeichnet und Brennweite genannt, also ist $b = f$; das Bild ist unendlich klein, weil alle Str. in dem Brennpunkte vereinigt werden. Dieser Gang aller parallelen Str. durch den Brennpunkt wird zur geom. Constr. der Bilder benutzt. Der erste Constructionsstr. ist der Hauptstrahl, da dieser ungebrochen weiter geht, also das Bild enthalten muß; der zweite Constructionsstr. ist ein zur Achse paralleler Str. (Fig. 199), der nach der Brechung durch den Brennpunkt F geht; wo die 2 Constructionsstr. sich schneiden, ist in a' das Bild von a. — Ist ein Gegenstand nicht gerade unendlich weit, aber doch verhältnißmäßig zur Größe der Linse sehr weit entfernt, wie z. B. die Sonne oder die Sterne, so liegt sein Bild auch unendlich nahe am Brennpunkte und ist außerordentlich klein; die Sonnenstr. vereinigen sich so zu sagen in dem Brennpunkte, erzeugen also dort ein sehr helles und sehr heißes Sonnenbild, das brennbare Körper leicht entzünden kann; daher rührt der Name Brenngläser. Diese Eigenschaft gekrümmter durchsichtiger Körper war schon dem Sänger Orpheus und dem weisen Sokrates bekannt, hat aber weder im Alterthume noch in den letzten Jahrhunderten zu anderen als Schau- und Spielzwecken gedient. Tschirnhausen (1691) verfertigte Brenngläser von 6 bis 12' Brennweite und 9'' Breite, Bernier (1774) riesige, hohle, mit Weingeist oder Terpentinöl gefüllte Linsen. In Paris wird durch eine Brennlinse jeden Tag die Mittagskanone gelöst und hierdurch der wahre Mittag angegeben. Gefüllte Wasserflaschen von kugeliger Form und Fensterglasschlieren können Feuersbrünste erzeugen. In Sonnenmikroskopen werden die kleinen Gegenstände durch die vereinigten Strahlen grell beleuchtet.

2. Liegt der Gegenstand weiter als die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so entsteht hinter der Linse ein reelles, verkleinertes umgekehrtes Bild, dessen Entfernung von der Linse größer als die einfache, aber kleiner als die doppelte Brennweite ist.

Denn setzen wir in der Grundformel $1/b + 1/d = 1/f$ oder $1/b = 1/f - 1/d$ für d einen Werth $> 2f$, so ergibt sich durch leichte Rechnung, daß $b < 2f$, während es $> f$ ist. Das Verhältniß der linearen Größe des Bildes zu derjenigen des Gegenstandes ergibt sich aus Fig. 199, in welcher das Bild a'b' des Gegenstandes ab nach der angegebenen Methode construirt worden ist. Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke abM und a'b'M folgt nämlich, daß $a'b' : ab = Mi' : Mi = b : d$. Setzen wir in das letzte Verhältniß den aus der Grundfl. folgenden Werth für $b = df/(d-f)$, so folgt das Verhältniß der Bildgröße zur Objectgröße $a'b' : ab = f : (d-f)$. So lange $d >$ ist als 2f, so lange ist $f < d - f$, also auch a'b' kleiner als ab, und zwar kommt das Bild dem Gegenstande an Größe um so näher, je näher der Gegenstand der doppelten Brennweite kommt. Rückt also der Gegenstand aus unendlicher Entf. immer näher, so rückt das anfänglich unendlich kleine Bild aus dem Brennpunkte nach der doppelten Brennweite zu und wächst an Größe. Das Bild ist umgekehrt, weil es auf der anderen Seite der Linse liegt und weil die Grenzhauptstrahlen sich demnach zwischen Bild und Gegenstand kreuzen. Diese Eigenschaft der Convexlinsen, von einem weit entfernten Gegenstande in der Nähe des Brennpunktes ein verkleinertes, umgekehrtes, reelles Bild hervorzurufen, hat die ausgedehnteste Anwendung in den Fernrohren und der Camera obscura.

Fig. 199.



3. Liegt der Gegenstand in der doppelten Brennweite, so fällt das reelle, umgekehrte, gleich große Bild hinter der Linse ebenfalls in die doppelte Brennweite.

Denn für den Fall, daß $d = 2f$ ist, ergibt die Grundformel ($1/b = 1/f - 1/d$) für b ebenfalls den Werth 2f. Die Veröẞerung $f:(d - f$ ist dann $= f:f$ oder $= 1:1$, d. h. es findet keine Vergrößerung statt.

4. **Liegt der Gegenstand zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite, so entsteht hinter der Linse ein reelles, umgekehrtes und vergrößertes Bild, dessen Entfernung von der Linse größer ist als die doppelte Brennweite, und das sich um so weiter entfernt, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte kommt.**

Denn setzen wir in der Grundfl. für d einen Werth $< 2f$, so ergibt sich leicht, daß $b > 2f$. Die lineare Vergrößerung $f:(d - f)$ ist dann größer als 1; folglich ist das Bild größer als der Gegenstand. Die Entf. des Bildes sowohl, als auch die Vergrößerung desselben sind um so bedeutender, je kleiner die Entf. d des Gegenstandes wird; beide nähern sich um so mehr dem Unendlichen, je mehr diese sich der einfachen Brennweite nähert. Rückt also der Gegenstand aus der doppelten Brennweite nach dem Brennpunkte zu, so rückt das Bild auf der anderen Seite der Linse aus der doppelten Brennweite hinaus nach dem Unendlichen hin und wächst dabei immer mehr an Größe. Auch diese Eigenschaft der Convexlinsen hat die ausgedehnteste Anwendung in Fernrohren, Mikroskopen, im Sonnenmikroskop, in der Zauberlaterne, der Schusterkugel 2c.

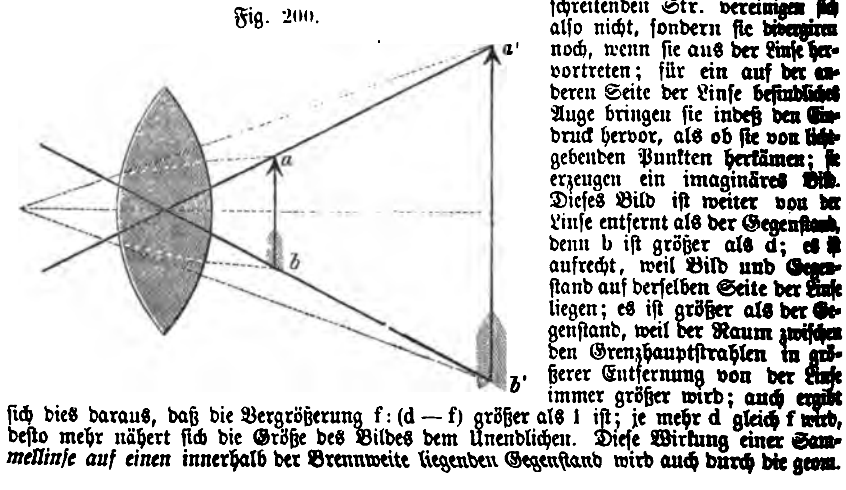
5. **Liegt der Gegenstand in dem Brennpunkte, so liegt das Bild in unendlicher Entfernung, d. h. die von dem Brennpunkte ausgehenden Strahlen werden durch die Linsenbrechung parallel.**

Denn setzen wir in der Grundfl. für d den Werth f, so ergibt sich $b = \infty$. Weil die Str. auf der anderen Seite parallel austreten, so erscheint von der anderen Seite her die ganze Linse glänzend und leuchtend; man macht von dieser Eigenschaft der Convexlinsen Anwendung in der Blendlaterne und auf den Leuchtthürmen. Da aber Linsen von solcher Größe, wie sie auf Leuchthürmen nöthig wären, nur mit großer Schwierigkeit anzufertigen sind, so hat Fresnel zu demselben Zwecke die Polyzonal-Linsen construirt; eine solche besteht aus einer von vielen concentrischen Glasringen umgebenen Mittellinse, deren Dimensionen so berechnet sind, daß sie alle einen gemeinschaftlichen Brennpunkt haben. In diesem befindet sich ein elektrisches Kohlenlicht oder Siderallicht, dessen nach oben und unten gehende Str. durch total reflectirende Prismen zurückgeworfen werden und daher alle in dem von mehren Polyzonallinsen eingeschlossenen Leuchtraume bleiben und dann durch diese parallel austreten müssen.

6. **Liegt der Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und der Linse, so entsteht auf derselben Seite ein imaginäres, aufrechtes und vergrößertes Bild, das weiter von der Linse entfernt ist als der Gegenstand und denselben um so mehr an Größe übertrifft, je näher der Gegenstand an dem Brennpunkte der Linse liegt.**

Denn für den Fall, daß $d < f$ ist, ergibt die Grundfl. einen negativen Ausdruck für b, der an Zahlenwerth größer als d ist; durch das neg. Zeichen ist ausgesprochen, daß die Str. eines Punktes sich nicht in der Richtung ihres Voranschreitens, sondern in entgegengesetzter Richtung, also durch Verlängerung nach rückwärts in einem Punkte schneiden. Die voranschreitenden Str. vereinigen sich also nicht, sondern sie divergiren noch, wenn sie aus der Linse hervortreten; für ein auf der anderen Seite der Linse befindliches Auge bringen sie indeß den Eindruck hervor, als ob sie von lichtgebenden Punkten herkämen; sie erzeugen ein imaginäres Bild. Dieses Bild ist weiter von der Linse entfernt als der Gegenstand, denn b ist größer als d; es ist aufrecht, weil Bild und Gegenstand auf derselben Seite der Linse liegen; es ist größer als der Gegenstand, weil der Raum zwischen den Grenzhauptstrahlen in größerer Entfernung von der Linse immer größer wird; auch ergibt sich dies daraus, daß die Vergrößerung $f:(d - f)$ größer als 1 ist; je mehr d gleich f wird, desto mehr nähert sich die Größe des Bildes dem Unendlichen. Diese Wirkung einer *Sammellinse auf einen* innerhalb der Brennweite liegenden Gegenstand wird auch durch die geom.

Fig. 200.



nd suche nach A. 547 dessen Gang; wo er die Achse schneidet, ist das Bild. — A. 549.)er Schüler übe sich im Auffinden der Bilder von Achsen- und anderen Punkten für diese nd alle anderen Linsenarten durch Constr. theils nach A. 547. theils nach den Regeln, die n Eingange von 304. angegeben sind. — A. 550. Ebenso sollen durch Constr. die Bilder on geraden und krummen Linien, von Flächen und Körpern gefunden werden für alle nur nkbaren Lagen gegen alle Linsenarten. — A. 551. Eine allgemeine Fl. für die Brennweite ner Linse abzuleiten? Aufl.: Die Fl. (42) in Verbindung mit $1/f = (n-1)(1/r + 1/r')$ ergibt $= \pm 2rr' / (r \pm r')$. — A. 552. Für einzelne Linsenarten die Größe von f zu finden? ufl.: Für die gleichs. biconv. ist $f = r$, für die planconvexe $f = 2r$, für die concav-conv., o $r = 2r'$, ist $f = 4r$; für die gleichs. biconc. ist $f = -r$, für planconc. $f = -2r$, für nvexconc. $(r = 2r')$ ist $f = -4r$; hierbei ist immer vorausgesetzt, daß $n = 3/2$; für ein nderes n ist allgemein $f = \pm rr' / (n-1)(r \pm r')$. — A. 553. Aus der Fl. $1/b + 1/d$ $= -(n-1)(1/r + 1/r')$ für concave Linsen die Lage, sowie auch die Größe von Bildern r alle Fälle zu berechnen, die in 304. für convexe Linsen betrachtet wurden. — A. 554. ie Radien einer Biconvexlinse seien 20 und 30^{cm}; wie groß ist ihre Brennweite; wo liegt nd wie groß ist bei dieser Linse das Bild eines 80^{cm} entfernten, 1^{m} langen Gegenstandes? ufl.: $f = 24^{cm}$; $b = 34\,^2/_7{}^{cm}$; Größe $= 42\,^6/_7{}^{cm}$. — A. 555. Das Bild eines Gegen- ndes soll bei dieser Linse 6 mal so groß als der Gegenstand sein; wo muß derselbe stehen? ufl.: $d = 28^{cm}$. — A. 556. Allgemein, wie weit muß bei einer Sammellinse in Brenn- eiten f ausgedrückt, der Gegenstand entfernt sein, damit sein Bild m mal so groß sei als selbst? Aufl.: $d = f(m+1)/m$. — A. 557. Wie weit muß von einer Sammellinse r Gegenstand entfernt sein, damit die Entfernung von seinem reellen Bild = m sei? ufl.: $d = \frac{1}{2}[m \pm \sqrt{(m^2 - 4fm)}]$.

. Die Lehre von der Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes.

Die Farbenlehre (Euler 1746).

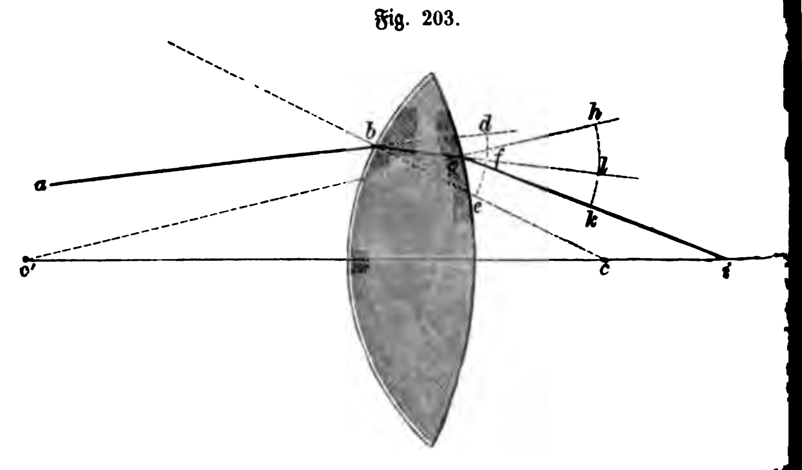
Licht und Farbe. Das Licht ist ein Zustand transversaler Aetherschwing- 308 ngen von 400 bis 800 Billionen in einer Secunde überhaupt; die Farbe ist n der Zahl nach bestimmter Schwingungszustand oder eine Mischung solcher be- mmten Schwingungszustände. Farbe und Licht sind demnach identisch; aber jede hwingungszahl zwischen den angegebenen Grenzen ist Licht, während jede an- re Schwingungszahl den Eindruck einer anderen Farbe erzeugt, und mehrere hwingungszahlen zusammen sich ebenfalls zu einem bestimmten Schwingungs- stande combiniren und daher ebenfalls einen bestimmten Farbeneindruck her- rrufen. Einfaches, homogenes oder einfarbiges Licht ist ein solcher hwingungszustand des Aethers, in welchem alle Aethertheilchen dieselbe Schwing- gsdauer haben oder in einer Secunde gleichviel Schwingungen vollziehen (homo- ne Farbe); gemischtes, zusammengesetztes Licht dagegen ist ein Schwing- gszustand des Aethers, in welchem die Bewegungen der Aethertheilchen aus hwingungen von verschiedener Dauer combinirt oder aus verschiedenen Schwing- gszahlen zusammengesetzt sind (heterogene Farbe).

Die meisten gewöhnlichen Lichtquellen, die Sonne, die irdischen Flammen und luthen, überhaupt alle glühenden festen und flüssigen Körper strahlen zusammen- setztes Licht aus, und zwar ist das Licht derselben aus zahllosen Schwingungs- hlen oder Farben zusammengesetzt; nahezu homogenes Licht, d. i. solches Licht, lches nur aus wenigen Schwingungszahlen, wenigen Farben besteht, wird von henden Dämpfen und leuchtenden Gasen (bei gewöhnlichem Drucke) ausgestrahlt; i höherem Drucke scheint die Zahl der von leuchtenden Gasen ausgestrahlten rben ebenfalls sehr groß zu sein.

Bekanntlich sind (nach den Annahmen der neueren Physik) die Mol. aller Körper in twährender, unendlich feiner, aber sehr rascher Bewegung, deren leb. Kft. die Temperatur Körper bildet; und zwar besitzen die Mol. der festen und flüssigen Körper schwingende wegungen. Bei gewöhnlicher Temp. ist die Schwz. der Körpermoleküle 100, 200, 300 lionen in 1 Sec.; nimmt die Temp. zu, so muß auch die leb. Kft. der Mol. zunehmen, h. die Amplitude der Schw. muß größer werden. Wenn aber die Amplitude der schwingen- Mol. größer wird, so werden manche Mol. an benachbarte anstoßen, sie können ihre

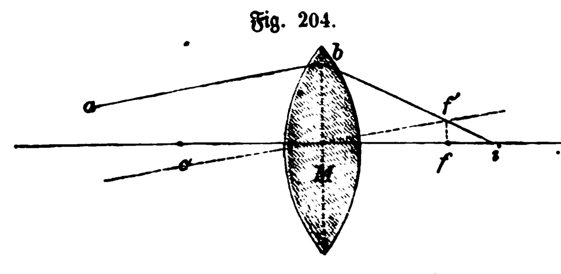
drehen, damit auch diese Stelle in Silberglanz erschien; der Einfallswinkel der Str. war dann für Butter $24^0\,12'$; hieraus berechnete er die B.-E. undurchsichtiger Körper; wie groß ist der B.-E. n' der Butter? And.: Man benutze die letzte Gl., setze aber dort n/n' für n, weil jetzt sin g nicht $= n$, sondern $= n/n'$; man erhält dann $n' = 1{,}474$. — A. 539. Durch Rechnung und Constr. den Weg eines Str. zu finden, der auf ein gleichseitiges Prisma unter 30^0 fällt? Aufl.: (Fig. 194) $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin\beta$; $\beta' = B - \beta$; $\sin\alpha' = {}^3/_2 \sin\beta$; hieraus $\alpha' = 77^0\,7'$. — A. 540. Unter welchem Winkel muß ein Str. auffallen, damit er in dem Prisma der Basis desselben parallel sei? Aufl.: $\beta = 90 - 60^0$; $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin 30 = 0{,}75$; $\alpha = 48^0\,35'$. — A. 541. In einem gleichseitigen Steinsalzprisma ist der Winkel der kleinsten Ablenkung $= 42^0\,10'$; wie groß ist der B.-E. des Steinsalzes? Aufl.: 1,557. — A. 542. Eine Tabelle für das Brechungsvermögen und die Molekularrefraction der S. 3… angeführten Körper zu berechnen. — A. 543. Den Gang eines schief einfallenden Str. durch eine biconvexe Linse von beiderseits ungleicher Krümmung (B.-E. $= {}^3/_2$) zu constr? And.: ab (Fig. 203) sei der Str., c und c' die Mittelpunkte der beiden Krümmungen der Linse; bei kleinen Einfallsw. kann $n = {}^3/_2$, das bekannte Sinusverhältniß, auch als das Verhältniß der Winkel oder der ihnen entsprechenden Bogen angesehen werden; hieraus ergibt sich der allerdings nur annähernd genaue Weg des Strahles abgi. — A. 544. Der optische Mittelpunkt hat nicht für alle Linsen die Definition S. 349; er ist derjenige Punkt einer Linse,

Fig. 203.



durch welchen alle Str. ungebrochen hindurch gehen, und liegt demnach für die gewöhnliche Linse in der Mitte des inneren Theiles der Achse, in der Mitte der Dicke d der Linse; wo liegt er aber im Allgemeinen, wenn r und r' die beiden Krümmungsradien sind? And.: Für einen durch diesen Punkt gehenden Str. muß der zweite Brechungsw. dem ersten Einfallsw. und daher auch der zweite Einfallsw. dem ersten Brechungsw. gleich sein; folglich müssen die beiden Einfallslothe einander parallel werden; daraus ergibt sich der Abstand des opt. M. von der einen Linsenfläche $= dr/(r + r')$ und von der anderen $= dr'/(r + r')$. — A. 545. Die Lage des optischen M. für die einzelnen Linsenarten anzugeben? A. 546. Die Lage des Brennpunktes für eine biconvexe Linse von beiderseits gleicher Krümmung zu finden? Aufl.: der Fl. $1/f = (n-1)(1/r + …$ und des B.-E. $= {}^3/_2$ … sich $f = r$; der Brennpunkt liegt in dem Mittelpunkte. A. 547. Den Gang eines … Achse divergenten und … convergenten Str. für eine solche Linse durch einfache Constr. zu finden? Aufl.: Fig. … Zu dem Str. ab ziehe man die Nebenachse c'M parallel und schneide darauf ab Mf' = … so ist bf'i der gebrochene Str.; ähnlich für einen conv. Str. — A. 548. Das Bild eines auf der Achse liegenden Punktes zu finden? And.: Man ziehe durch den Punkt einen …

Fig. 204.



nd suche nach A. 547 dessen Gang; wo er die Achse schneidet, ist das Bild. — A. 549. Der Schüler übe sich im Auffinden der Bilder von Achsen- und anderen Punkten für diese nd alle anderen Linsenarten durch Constr. theils nach A. 547. theils nach den Regeln, die n Eingange von 304. angegeben sind. — A. 550. Ebenso sollen durch Constr. die Bilder on geraden und krummen Linien, von Flächen und Körpern gefunden werden für alle nur enkbaren Lagen gegen alle Linsenarten. — A. 551. Eine allgemeine Fl. für die Brennweite iner Linse abzuleiten? Aufl.: Die Fl. (42) in Verbindung mit $1/f = (n-1)(1/r + 1/r')$ ergibt $= \pm 2rr' / (r \pm r')$. — A. 552. Für einzelne Linsenarten die Größe von f zu finden? ufl.: Für die gleichs. biconv. ist $f = r$, für die planconvexe $f = 2r$, für die concav-conv., o $r = 2r'$, ist $f = 4r$; für die gleichs. biconc. ist $f = -r$, für planconc. $f = -2r$, für onvexconc. $(r = 2r')$ ist $f = -4r$; hierbei ist immer vorausgesetzt, daß $n = 3/2$; für ein nderes n ist allgemein $f = \pm rr' / (n-1)(r \pm r')$. — A. 553. Aus der Fl. $1/b + 1/d = -(n-1)(1/r + 1/r')$ für concave Linsen die Lage, sowie auch die Größe von Bildern r alle Fälle zu berechnen, die in 304. für convexe Linsen betrachtet wurden. — A. 554. ie Radien einer Biconvexlinse seien 20 und 30cm; wie groß ist ihre Brennweite; wo liegt nd wie groß ist bei dieser Linse das Bild eines 80cm entfernten, 1m langen Gegenstandes? ufl.: $f = 24$cm; $b = 34\,2/7$cm; Größe $= 42\,6/7$cm. — A. 555. Das Bild eines Gegenandes soll bei dieser Linse 6 mal so groß als der Gegenstand sein; wo muß derselbe stehen? ufl.: $d = 28$cm. — A. 556. Allgemein, wie weit muß bei einer Sammellinse in Brenneiten f ausgedrückt, der Gegenstand entfernt sein, damit sein Bild m mal so groß sei als selbst? Aufl.: $d = f(m+1)/m$. — A. 557. Wie weit muß von einer Sammellinse n Gegenstand entfernt sein, damit die Entfernung von seinem reellen Bild $= m$ sei? ufl.: $d = 1/2\,[m \pm \sqrt{(m^2 - 4fm)}]$.

. Die Lehre von der Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes.

Die Farbenlehre (Euler 1746).

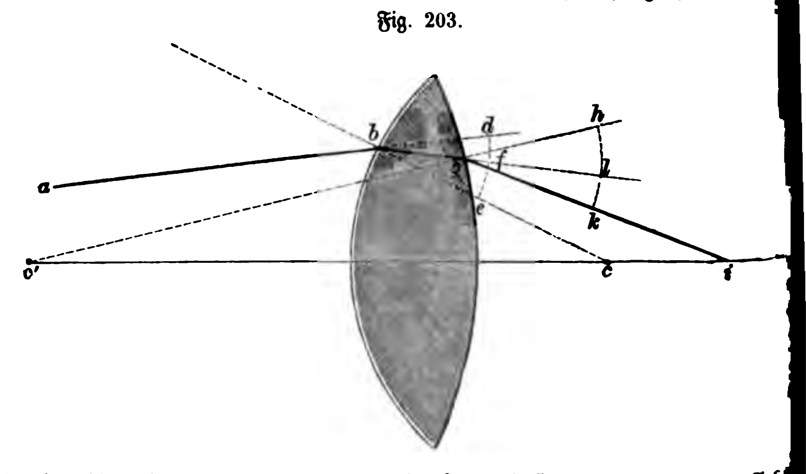
Licht und Farbe. Das Licht ist ein Zustand transversaler Aetherschwingungen von 400 bis 800 Billionen in einer Secunde überhaupt; die Farbe ist n der Zahl nach bestimmter Schwingungszustand oder eine Mischung solcher beimmten Schwingungszustände. Farbe und Licht sind demnach identisch; aber jede chwingungszahl zwischen den angegebenen Grenzen ist Licht, während jede an- re Schwingungszahl den Eindruck einer anderen Farbe erzeugt, und mehrere chwingungszahlen zusammen sich ebenfalls zu einem bestimmten Schwingungsstande combiniren und daher ebenfalls einen bestimmten Farbeneindruck herrrufen. *Einfaches, homogenes oder einfarbiges Licht* ist ein solcher chwingungszustand des Aethers, in welchem alle Aethertheilchen dieselbe Schwingngsdauer haben oder in einer Secunde gleichviel Schwingungen vollziehen (homone Farbe); *gemischtes, zusammengesetztes Licht* dagegen ist ein Schwingngszustand des Aethers, in welchem die Bewegungen der Aethertheilchen aus chwingungen von verschiedener Dauer combinirt oder aus verschiedenen Schwingngszahlen zusammengesetzt sind (heterogene Farbe). 308

Die meisten gewöhnlichen Lichtquellen, die Sonne, die irdischen Flammen und luthen, überhaupt alle glühenden festen und flüssigen Körper strahlen zusammensetztes Licht aus, und zwar ist das Licht derselben aus zahllosen Schwingungshlen oder Farben zusammengesetzt; nahezu homogenes Licht, d. i. solches Licht, lches nur aus wenigen Schwingungszahlen, wenigen Farben besteht, wird von hhenden Dämpfen und leuchtenden Gasen (bei gewöhnlichem Drucke) ausgestrahlt; i höherem Drucke scheint die Zahl der von leuchtenden Gasen ausgestrahlten rben ebenfalls sehr groß zu sein.

Bekanntlich sind (nach den Annahmen der neueren Physik) die Mol. aller Körper in twährender, unendlich feiner, aber sehr rascher Bewegung, deren leb. Kft. die Temperatur r Körper bildet; und zwar besitzen die Mol. der festen und flüssigen Körper schwingende wegungen. Bei gewöhnlicher Temp. ist die Schwz. der Körpermoleküle 100, 200, 300 llionen in 1 Sec.; nimmt die Temp. zu, so muß auch die leb. Kft. der Mol. zunehmen, h. die Amplitude der Schw. muß größer werden. Wenn aber die Amplitude der schwingenn Mol. größer wird, so werden manche Mol. an benachbarte anstoßen, sie können ihre

drehen, damit auch diese Stelle in Silberglanz erschien; der Einfallswinkel der Str. w
dann für Butter 24° 12′; hieraus berechnete er die B.-E. undurchsichtiger Körper; wie g
ist der B.-E. n′ der Butter? And.: Man benutze die letzte Gl., setze aber dort n / n′
n, weil jetzt sin g nicht = n, sondern = n / n′; man erhält dann n′ = 1,474. — A. 5
Durch Rechnung und Constr. den Weg eines Str. zu finden, der auf ein gleichseitiges Pri
unter 30° fällt? Aufl.: (Fig. 194) $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin\beta$; $\beta' = B - \beta$; $\sin\alpha' = {}^3/_2 \sin\beta$;
aus $\alpha' = 77^\circ\, 7'$. — A. 540. Unter welchem Winkel muß ein Str. auffallen, damit e
dem Prisma der Basis desselben parallel sei? Aufl.: $\beta = 90 - 60^\circ$; $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin 30$
0,75; $\alpha = 48^\circ\, 35'$. — A. 541. In einem gleichseitigen Steinsalzprisma ist der Winkel
kleinsten Ablenkung = 42° 10′; wie groß ist der B.-E. des Steinsalzes? Aufl.: 1,557.
A. 542. Eine Tabelle für das Brechungsvermögen und die Molekularrefraction der S.
angeführten Körper zu berechnen. — A. 543. Den Gang eines schief einfallenden Str. d
eine biconvexe Linse von beiderseits ungleicher Krümmung (B.-E. = ³/₂) zu constr? A
ab (Fig. 203) sei der Str., c und c′ die Mittelpunkte der beiden Krümmungen der L
bei kleinen Einfallsw. kann n = ³/₂, das bekannte Sinusverhältniß, auch als das Verhä
der Winkel oder der ihnen entsprechenden Bogen angesehen werden; hieraus ergibt sich
allerdings nur annähernd genaue Weg des Strahles abgi. — A. 544. Der optische Mi
punkt hat nicht für alle Linsen die Definition S. 349; er ist derjenige Punkt einer L

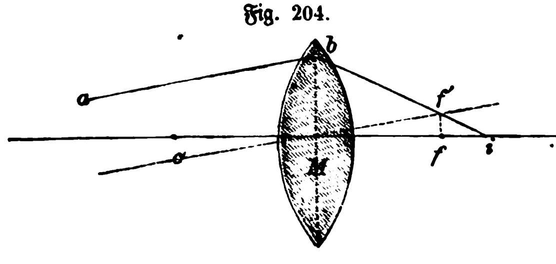
Fig. 203.



durch welchen alle Str. ungebrochen hindurch gehen, und liegt demnach für die gewöhnl
Linse in der Mitte des inneren Theiles der Achse, in der Mitte der Dicke d der Linse;
liegt er aber im Allgemeinen, wenn r und r′ die beiden Krümmungsradien sind? A
Für einen durch diesen Punkt gehenden Str. muß der zweite Brechungsw. dem ersten E
fallsw. und daher auch der zweite Einfallsw. dem ersten Brechungsw. gleich sein; fol
müssen die beiden Einfallslothe einander parallel werden; daraus ergibt sich der Abstand
opt. M. von der einen Linsenfläche $= dr / (r + r')$ und von der anderen $= dr' / (r + r')$

A. 545. Die Lage des
tischen M. für die ein
Linsenarten anzugeben?
A. 546. Die Lage des Br
punktes für eine bicon
von beiderseits gleicher Kr
mung zu finden? Aufl.:
der Fl. $1/f = (n-1)(1/r + $
und des B.-E. = ³/₂ e
sich f = r; der Brennp
liegt in dem Mittelpunkte.
A. 547. Den Gang eines
Achse divergenten und e

Fig. 204.



convergenten Str. für eine solche Linse durch einfache Constr. zu finden? Aufl.: Fig.
Zu dem Str. ab ziehe man die Nebenachse c′M parallel und schneide darauf ab Mf′ =
so ist bf′ i der gebrochene Str.; ähnlich für einen conv. Str. — A. 548. Das Bild e
auf der Achse liegenden Punktes zu finden? And.: Man ziehe durch den Punkt einen

und suche nach A. 547 dessen Gang; wo er die Achse schneidet, ist das Bild. — A. 549.
Der Schüler übe sich im Auffinden der Bilder von Achsen- und anderen Punkten für diese
und alle anderen Linsenarten durch Constr. theils nach A. 547. theils nach den Regeln, die
m Eingange von 304. angegeben sind. — A. 550. Ebenso sollen durch Constr. die Bilder
von geraden und krummen Linien, von Flächen und Körpern gefunden werden für alle nur
enkbaren Lagen gegen alle Linsenarten. — A. 551. Eine allgemeine Fl. für die Brennweite
iner Linse abzuleiten? Aufl.: Die Fl. (42) in Verbindung mit $1/f = (n - 1)(1/r + 1/r')$ ergibt
$= \pm 2rr' / (r \pm r')$. — A. 552. Für einzelne Linsenarten die Größe von f zu finden?
Aufl.: Für die gleichs. biconv. ist $f = r$, für die planconvexe $f = 2r$, für die concav-conv.,
wo $r = 2r'$, ist $f = 4r$; für die gleichs. biconc. ist $f = -r$, für planconc. $f = -2r$, für
convexconc. ($r = 2r'$) ist $f = -4r$; hierbei ist immer vorausgesetzt, daß $n = 3/2$; für ein
anderes n ist allgemein $f = \pm rr' / (n - 1)(r \pm r')$. — A. 553. Aus der Fl. $1/b + 1/d$
$= -(n - 1)(1/r + 1/r')$ für concave Linsen die Lage, sowie auch die Größe von Bildern
für alle Fälle zu berechnen, die in 304. für convexe Linsen betrachtet wurden. — A. 554.
Die Radien einer Biconvexlinse seien 20 und 30^{cm}; wie groß ist ihre Brennweite; wo liegt
und wie groß ist bei dieser Linse das Bild eines 80^{cm} entfernten, 1^{m} langen Gegenstandes?
Aufl.: $f = 24^{cm}$; $b = 34^{2}/_{7}{}^{cm}$; Größe $= 42^{6}/_{7}{}^{cm}$. — A. 555. Das Bild eines Gegen-
standes soll bei dieser Linse 6 mal so groß als der Gegenstand sein; wo muß derselbe stehen?
Aufl.: $d = 28^{cm}$. — A. 556. Allgemein, wie weit muß bei einer Sammellinse in Brenn-
weiten f ausgedrückt, der Gegenstand entfernt sein, damit sein Bild m mal so groß sei als
: selbst? Aufl.: $d = f(m + 1)/m$. — A. 557. Wie weit muß von einer Sammellinse
n Gegenstand entfernt sein, damit die Entfernung von seinem reellen Bild $= m$ sei?
Aufl.: $d = \frac{1}{2}[m \pm \sqrt{(m^2 - 4fm)}]$.

. Die Lehre von der Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes.

Die Farbenlehre (Euler 1746).

Licht und Farbe. Das Licht ist ein Zustand transversaler Aetherschwing- 308
ngen von 400 bis 800 Billionen in einer Secunde überhaupt; die Farbe ist
n der Zahl nach bestimmter Schwingungszustand oder eine Mischung solcher be-
immten Schwingungszustände. Farbe und Licht sind demnach identisch; aber jede
chwingungszahl zwischen den angegebenen Grenzen ist Licht, während jede an-
re Schwingungszahl den Eindruck einer anderen Farbe erzeugt, und mehrere
chwingungszahlen zusammen sich ebenfalls zu einem bestimmten Schwingungs-
stande combiniren und daher ebenfalls einen bestimmten Farbeneindruck her-
rrufen. Einfaches, homogenes oder einfarbiges Licht ist ein solcher
chwingungszustand des Aethers, in welchem alle Aethertheilchen dieselbe Schwing-
ngsdauer haben oder in einer Secunde gleichviel Schwingungen vollziehen (homo-
ne Farbe); gemischtes, zusammengesetztes Licht dagegen ist ein Schwing-
ngszustand des Aethers, in welchem die Bewegungen der Aethertheilchen aus
chwingungen von verschiedener Dauer combinirt oder aus verschiedenen Schwing-
ngszahlen zusammengesetzt sind (heterogene Farbe).

Die meisten gewöhnlichen Lichtquellen, die Sonne, die irdischen Flammen und
luthen, überhaupt alle glühenden festen und flüssigen Körper strahlen zusammen-
setztes Licht aus, und zwar ist das Licht derselben aus zahllosen Schwingungs-
hlen oder Farben zusammengesetzt; nahezu homogenes Licht, d. i. solches Licht,
lches nur aus wenigen Schwingungszahlen, wenigen Farben besteht, wird von
lhenden Dämpfen und leuchtenden Gasen (bei gewöhnlichem Drucke) ausgestrahlt;
i höherem Drucke scheint die Zahl der von leuchtenden Gasen ausgestrahlten
rben ebenfalls sehr groß zu sein.

Bekanntlich sind (nach den Annahmen der neueren Physik) die Mol. aller Körper in
twährender, unendlich feiner, aber sehr rascher Bewegung, deren leb. Kft. die Temperatur
: Körper bildet; und zwar besitzen die Mol. der festen und flüssigen Körper schwingende
wegungen. Bei gewöhnlicher Temp. ist die Schwz. der Körpermoleküle 100, 200, 300
lionen in 1 Sec.; nimmt die Temp. zu, so muß auch die leb. Kft. der Mol. zunehmen,
h. die Amplitude der Schw. muß größer werden. Wenn aber die Amplitude der schwingen-
ı Mol. größer wird, so werden manche Mol. an benachbarte anstoßen, sie können ihre

Schw. nicht vollständig ausführen, ihre Schwingungszeit wird kleiner, ihre Schwingungszahl größer. Bei steigender Temp. wird also die Schwz. vieler Mol. größer; während viele ihre früheren Schwzn. beibehalten, wächst die Schwz. bei einem Theile der Mol. immer mehr und erreicht endlich bei 500° die Zahl von 400 Bill:; daher fangen alle Körper bei 500° an zu leuchten und zwar mit rothem Lichte. Steigt die Temperatur noch höher, so nehmen viele Mol. noch größere Schwzn. an, 600, 800, 1000 und mehr Bill. in der Sec., ohne daß die niedrigeren Schwzn. verschwinden. Weißglühende feste und flüssige Körper von 1000—2000° C. strahlen eine unendliche Anzahl von verschiedenen Schwingungszahlen aus. Die Verschiedenheit dieser Schwzn. findet schon darin ihre Erklärung, daß nicht alle Mol. gegen einander stoßen, wird aber noch klarer, wenn man die unendliche Verschiedenheit bedenkt, in welcher die Mol. fester und flüssiger Körper und ihrer Lage gegen einander sich befinden, wodurch dieselben mit den verschiedensten Kräften in ihrer Lage festgehalten werden und somit durch eine äußere Einwirkung, wie eine hohe Temp., die allerverschiedensten Bewegungen annehmen müssen. — Die Mol. der luftförmigen Körper haben bekanntlich fortschreitende Bewegung, können also nicht schwingen; darum leuchten auch die farblosen Gase, wie O, N u. s. w. selbst in der höchsten Hitze nicht. Da sie indessen dennoch zum Leuchten gebracht werden, z. B. durch den elektrischen Funken, den Rhumkorff'schen Funkenstrom, wie auch brennender Wasserstoff ein schwaches, blaues Licht ausstrahlt, so bleibt nur die Annahme übrig, daß das Licht der luftförmigen Körper aus Schw. der Atome innerhalb der Mol. besteht. Die Erscheinungen der abnormen Dampfdichte (62. u. 416.), die Eigenschaften des gesättigten Dampfes (411.) und manche chemische Thatsachen zeigen uns, daß die Mol. nicht aus den einfachsten, dem Verbindungsgewicht entsprechenden Atomzahlen bestehen; Wasser kann hiernach ebensowohl H_4O_2, oder $H_{20}O_{10}$ sein, als H_2O; nach 62. muß Schwefeldampf von 500° in jedem Mol. 3mal soviel At. enthalten als bei 1000°; ist das letztere Mol. S_2, so muß das erstere S_6 sein; S_5 und S_{15} genügen aber auch. Kurz die Mol. bestehen aus einer größeren Anzahl von At., als man bisher annahm; so kann Sauerstoff $= O_8$, Wasserstoff $= H_6$ u. s. w. sein; immerhin ist jedoch die Anzahl der Atome in einem Mol. eine beschränkte; daher können sich die Atome der Luftarten nur mit wenig verschiedenen Kräften festhalten, sie sind nur auf wenige Schwz. abgestimmt. Die Luftarten strahlen im leuchtenden Zustande nur wenige Farben aus, ihr Licht ist dem homogenen Lichte nahe.

309 **Verschiedene Brechbarkeit der verschiedenen Schwingungszahlen.** (Newton 1675, Cauchy 1836). Zum Nachweise der vorausgehenden Sätze bedürfen wir einer Eigenschaft der verschiedenen Farben oder Schwingungszahlen, welche anfänglich überraschend erscheinen mag, da sie früher vorgetragenen Lehren zu widersprechen scheint. Die Lichtstrahlen haben eine nach der Schwingungszahl verschiedene Brechbarkeit; je größer die Schwingungszahl ist, desto stärker werden die Strahlen gebrochen; das rothe Licht erfährt die geringste, das violette Licht die stärkste Brechung.

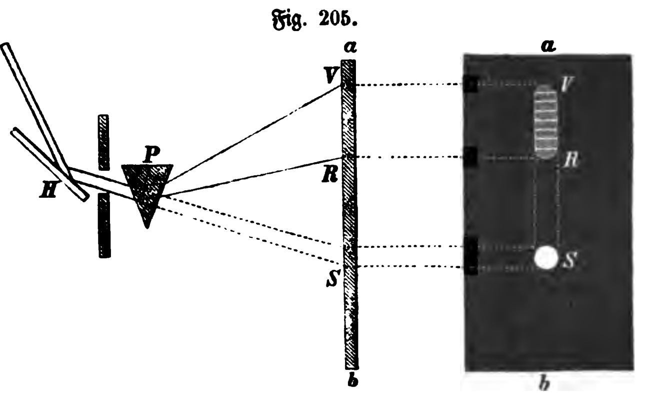
Dies widerspricht insofern früheren Lehren, als die Brechung in einer Aenderung der Fortpflanzungsgeschw. beruht, und als diese Geschw. sowohl beim Schalle (273.) als auch beim Lichte (286.) unabhängig von der Größe und der Dauer der Schw. sein soll; die bekannte Formel $c = \sqrt{(e/d)}$ zeigt uns die Geschw. des Lichtes zwar als von der Dichte und der Elasticität des Aethers abhängig, aber ganz unberührt von der Intensität und der Farbe des Lichtes, was in dem betreffenden Abschnitte besonders hervorgehoben wurde. Es ist dies auch vollkommen richtig für den freien Aether des sogenannten leeren Weltraumes; hier pflanzt sich jede Lichtstärke und jede Lichtfarbe mit gleicher Geschw. fort; es gilt auch unendlich nahe für den fast freien Aether der Luftarten. Würde es auch noch für den durch die körperliche Anziehung der Mol. beeinflußten Aether der Körperwelt gelten, würden sich also auch die verschiedenen Farben oder Schwzn. durch die Körper mit gleicher Geschw. fortpflanzen, also bei dem Eintritte in die Körper eine ganz gleiche Verminderung der Geschw. erfahren, so würde auch die Folge dieser Verminderung, die Brechung nämlich, für alle Schwzn. dieselbe sein. Dies ist aber nicht der Fall. In den Körpern ist nämlich der Aether zwar von derselben Elasticität, aber von größerer Dichte als im leeren Raume; auch ist er zwischen die Körpermol. eingeschlossen, kann also nicht frei ausweichen wie im leeren Raume; folglich wird bei jeder Schw. der vor dem schwingenden Atom befindliche Aether noch mehr verdichtet; es hat also die eindringende Lichtbewegung einen gewissen Widerstand bei jeder Schw. zu überwinden; dieser Widerstand muß daher mit der Schwz. zunehmen; da nun die Folge dieses Widerstandes eine Verminderung der Geschw. des Lichtes ist, so muß Licht von großer Schwz. sich etwas langsamer durch einen Körper fortpflanzen als Licht von kleiner Schwz. Von der Verminderung der Geschw. rührt aber die Brechung her (232.); die

Brechung ist um so stärker, je mehr die Geschw. vermindert wird; folglich müssen hohe Schwzn. stärker gebrochen werden als niedere.

Zerlegung des Lichtes durch Brechung in Prismen (Newton 1666). Auf 310 der verschiedenen Brechbarkeit der verschiedenen Schwingungszahlen oder Farben beruhen die berühmten Versuche Newtons über die Zerlegung des Lichtes durch Prismen, welche der Theorie weit vorausgeeilt sind, ja diese Theorie sehr viel später erst geschaffen haben.

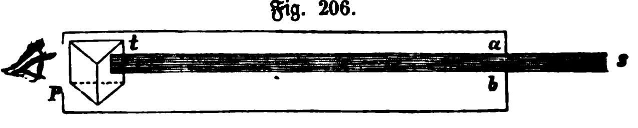
1. Läßt man (Fig. 205) durch eine Oeffnung in einem Fensterladen mittels eines Heliostaten H Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer bringen und auf einen Schirm ab fallen, so zeigt sich auf demselben ein kreisförmiges Sonnenbild S. Stellt man dem Strahlenbündel ein Glasprisma P in den Weg, so verschwindet der helle Kreis; statt dessen erscheint an einer der brechenden Kante entgegengesetzten Stelle ein Streifen VR von der Breite des Kreises, an den Seiten geradlinig, an den Enden bogenförmig begrenzt, nicht hell weiß, sondern siebenfarbig: roth, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett, das rothe Ende der ursprünglichen Lage des Sonnenbildes am nächsten, das violette am weitesten entfernt. Die Farben gehen ohne irgend eine Unterbrechung allmälig in einander über. Der farbige Streifen wird Spectrum genannt. Ein ähnliches Spectrum gibt auch das Licht der meisten künstlichen Lichtquellen, Knallgaslicht, weißglühende Metalle, das elektrische Kohlenlicht, Gas-, Kerzen- und Oelflammen, Magnesiumlicht u. s. w.

Fig. 205.



Dieses Spectrum ist ein objectives, da es wie ein Object von allen gegenwärtigen Personen gleichzeitig gesehen werden kann.

Fig. 206.



Ein subjectives Spectrum sieht eine Person, wenn sie durch das Spectroskop (Fig. 206) nach dem Himmel, einer hellen Wand, einer Flamme oder Gluth schaut; dieses einfachste Spectroskop besteht nur aus einem innen geschwärzten Rohre, das an einem Ende eine Spaltöffnung, am anderen ein Prisma trägt (Mousson 1861).

2. Macht man in den Schirm an der Stelle des rothen Streifens des Spectrums eine Oeffnung und läßt das durchgedrungene rothe Licht auf einen zweiten Schirm fallen, so erhält man dort den rothen Streifen; stellt man aber dem rothen Strahlenbündel ein zweites Prisma in den Weg, so verschwindet der rothe Streifen von seiner ersten Stelle, erscheint aber unverändert an einer anderen, von der brechenden Kante des Prismas abgewendeten Stelle des Schirmes. Macht man denselben Versuch mit einem anderen farbigen Streifen des Spectrums, so erhält man immer dasselbe Resultat, nur ist die zweite Stelle des Streifens um so weiter von der ersten entfernt, je näher die Farbe dem Violett liegt.

Diese Versuche zeigen die Wahrheit der vorausgegangenen Sätze, daß die verschiedenen Farben oder Schwzn. eine verschiedene Brechbarkeit besitzen, und daß das weiße Sonnen-

licht, wie auch das Licht der gewöhnlichen künstlichen Lichtquellen zusammengesetzt ist. Gegen den letzten Satz könnte man den Einwand erheben, daß die Farben des Spectrums durch eine Stoffeinwirkung des Prismas auf das Licht entstanden sein könnten, nicht aber schon vorher in dem Lichte vorhanden gewesen sein müßten. Dieser Einwand wird zunächst dadurch widerlegt, daß Prismen aus den verschiedensten Stoffen zwar die Länge des ganzen Spectrums, sowie das Verhältniß der einzelnen Theile verändern können, daß sie dagegen sämmtlich immer dieselben Farben liefern, wie auch dadurch, daß ein zweites Prisma, das parallel oder geneigt zum ersten gestellt ist, keine Farbenänderung mehr hervorruft, sondern die Farben nur mehr aus einander zieht. Am entschiedensten aber wird jener Einwand dadurch widerlegt, daß man aus den farbigen Str., die man aus dem Prisma hervorgehen sieht, das ursprüngliche weiße Sonnenlicht wieder herstellen kann.

3. Stellt man zwischen das Prisma und den Schirm eine Sammellinse, so wird das Spectrum wieder in einen hellen Kreis verwandelt. Stellt man hinter das erste Prisma ein zweites ganz gleiches in entgegengesetzter Lage, oder betrachtet man das farbige Spectrum durch ein zweites Prisma in geeigneter Lage, so erscheint das ursprünglich helle Sonnenbild wieder. Läßt man das Prisma durch eine mechanische Vorrichtung rasch oscilliren, so daß auch das Spectrum oscillirt, so erscheint es in der Mitte wieder weiß. Bringt man auf einer kreisförmigen Scheibe die 7 Farben sectorförmig in demselben Verhältnisse an, wie sie sich in dem Spectrum finden, so erscheint der Kreis bei rascher Drehung weiß (Farbenkreisel). Läßt man die 7 Farben auf 7 verschiedene Spiegel von solcher Stellung fallen, daß die Farben auf dieselbe Stelle einer Tafel reflectirt werden, so entsteht dort ein weißes Bild.

Daß die aus dem Prisma tretenden Str. eine verschiedene Richtung haben, kann man an ihrem Wege durch den dunkeln Zimmerraum wahrnehmen, wo die Luftstäubchen durch dieselben farbig beleuchtet sind. Geht man mit dem Schirme zu nahe an die Oeffnung, so erscheint das Spectrum weiß mit einem violetten Saume an dem einen und einem rothen am anderen Ende, weil sich zwischen beiden die Farben decken und vereinigen. Ebenso erscheint durch ein Prisma gesehen der Spalt sowohl wie jeder andere helle Raum ebenso hell und nur mit dem blauvioletten und dem rothgelben Saume versehen; denn die Spectra der zahllosen inneren Lichtpunkte eines hellen Raumes decken sich gegenseitig und vereinigen sich zu Weiß; nur am einen Rande bleiben die wenigstgebrochenen und am anderen die meistgebrochenen Farben ungedeckt.

Die eigenthümliche Form des auf die angeführte Weise erhaltenen Sonnenspectrums erklärt sich dadurch, daß die ursprünglich parallelen verschiedenfarbigen Sonnenstr. nach der prismatischen Brechung divergiren, und daß nur noch die gleichfarbigen parallel mit einander weiter laufen; jedes farbige Strahlenbündel erzeugt ein gleichfarbiges Sonnenbild auf dem Schirme; es entstehen daher so viele verschiedenfarbige Sonnenbilder, als verschiedene Schwzn. in dem ursprünglichen Strahlenbündel enthalten waren. Die Mittelpunkte dieser farbigen Kreise liegen in einer geraden Linie, weil die Brechung der verschiedenen Strahlen nach einer und derselben Richtung hin stattfindet; daher bilden auch die Kreise seitlich eine geradlinige Begrenzung und lassen nur an den Enden zwei halbkreisförmige Krümmungen zurück. Daß wirklich das Sp. aus einzelnen farbigen Kreisen besteht, kann man sehen, wenn man dasselbe durch ein mit Kupferoxyd roth gefärtes Glas oder durch ein aus planparallelen Glasplatten gebildetes und mit Kupferammoniumsulfat gefülltes, dünnes Gefäß betrachtet; im ersten Falle sieht man nur einen rothen, im letzten einen blauen Kreis, weil das rothe Glas alle eintretenden Str. außer den rothen verschluckt, und weil die blaue Flüssigkeit ebenso nur die blauen Str. durchläßt. Wieviele solcher Sonnenbilder vorhanden sind, ist durch directe Beobachtung nicht wahrnehmbar. Newton unterschied 7 Farben, um eine Analogie des Sonnenlichtes mit den 7 Tönen der Octave aufstellen zu können. Helmholtz unterscheidet 10 Farben, nämlich außer den genannten 7 noch Goldgelb zwischen Orange und Gelb, Gelbgrün zwischen Gelb und Grün, Blaugrün zwischen Grün und Blau, und sieht bei der Anwendung von Quarzprismen auch jenseits des Violett, im sogenannten Ultraviolett, noch ein schwaches Lavendelgrau. Genauer betrachtet entstehen soviele Sonnenbilder, als auf das Auge wirksame Schwzn. in dem Sonnenlichte enthalten sind, von denen diejenigen, die von nahe beisammen liegenden Schwzn. herrühren, auch nahe beisammen liegen und sich daher theilweise decken. Folglich können in dem so erhaltenen Sonnenspectrum die einzelnen Farben nicht genau homogen sein; um genau homogenes Licht zu erhalten und um zu erproben, ob in dem Sonnenlichte keine Schwzn. zwischen den angegebenen Grenzen fehlen, sowie auch für sonstige genauere Untersuchungen, ist eine andere Methode zur Bildung des Spectrums nothwendig.

Das reine Sonnenspectrum und die Fraunhofer'schen Linien (Fraunhofer 1814, Kirchhoff 1860). Das subjective Spectrum kann zu besonderer Reinheit gesteigert werden. Fraunhofer stellte vor einem Fernrohre das Prisma auf und richtete das Fernrohr so, daß die durch einen schmalen Spalt im Fensterladen auf das Prisma fallenden und durch dasselbe gebrochenen Strahlen (Wollaston 1802) in die Achse des Fernrohres fielen. Noch genauer ist Kirchhoffs Methode (Fig. 207). 311

Das Rohr A trägt an seinem hinteren Ende eine Spaltvorrichtung, mittels welcher ein das Licht einlassender Spalt durch Schrauben bald schmal, bald breit gemacht werden kann. Die Sammellinse an dem vorderen sichtbaren Ende des Rohres hat eine solche Brennweite, daß der Spalt genau in dem Brennpunkte liegt, und daß demnach die aus

Fig. 207.



der Linse tretenden Str. eines jeden Spaltpunktes und die Str. aller Spaltpunkte einander parallel sind. Hierdurch erhält das Bündel paralleler Str. die scharfe, schmale, linienartige Form des Spaltes. Dieses Strahlenbündel geht nun durch vier Flintglasprismen (bei Gassiot in Kew durch 9, bei Merz gar durch 11 Flintglasprismen, bei Cooke durch 9 Schwefelkohlenstoffprismen) und wird dadurch in so viele farbige Strahlenbündel von der Form und Größe des Spaltes zerlegt, als in dem Lichte des Bündels homogene Farben oder Schwzn. combinirt waren. Je mehr die Schwzn. von einander verschieden sind, desto weiter werden die betreffenden farbigen Strahlenbündel von einander entfernt sein; durch zwei eng nebeneinander liegende Schwzn. werden auch zwei eng beisammen liegende Strahlenbündel entstehen; ist eine zwischen zwei Zahlen liegende Schwz. nicht vorhanden, so wird auch zwischen den zwei jenen Zahlen entsprechenden Strahlenbündeln ein dunkler Raum vorhanden sein, der ebenfalls die Form des Spaltes hat. Läßt man nun die aus dem letzten Prisma austretende divergirende Lichtmasse in ein Fernrohr B treten, so wird man sowohl die dunkeln Zwischenräume, falls solche vorhanden sind, als auch die spaltförmigen Vorderflächen der einzelnen Strahlenbündel vergrößert sehen; jedes einzelne Strahlenbündel muß in der Form eines farbigen Streifens von der Gestalt des Spaltes erscheinen. Wenn die Schwzn. ununterbrochen auf einander folgen, so muß auch ein Streifen sich unmittelbar an den anderen schließen, die Farben müssen unmerklich in einander übergehen, es muß ein continuirliches Spectrum entstehen, das die Form eines langgezogenen Bandes von der Breite der Spaltlänge besitzt; fehlen aber einzelne Schwzn., so muß das farbige Band von dunkeln Linien unterbrochen sein.

Richtet man nun die Spaltöffnung eines solchen (oder ähnlichen Apparates) auf weißglühende feste oder flüssige Körper, so erhält man ein **continuirliches Spectrum**: Weißglühende feste oder flüssige Körper enthalten daher alle Schwing=

ungszahlen zwischen 400 und 800 Billionen. **Richtet man die Spaltöffnung auf die Sonne oder einen Fixstern, so erhält man ein von dunkeln Linien durchzogenes continuirliches Spectrum** (Fig. 208): **Das Licht der Sonne und der Fixsterne enthält zwar sehr viele Schwingungszahlen, doch fehlt innerhalb der angegebenen Grenzen eine beträchtliche Anzahl derselben. Wodurch dieselben verlöscht oder bis zur Dunkelheit geschwächt sind, wird später noch betrachtet werden.**

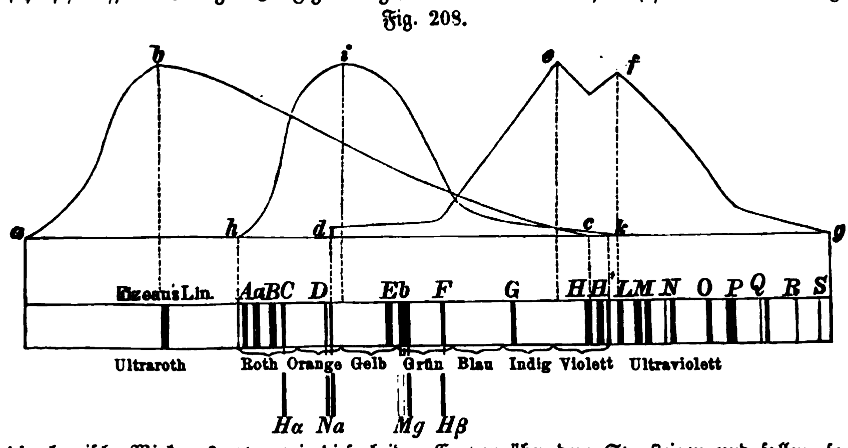
Die dunkeln (zuerst von Wollaston 1802 in geringer Zahl wahrgenommenen) Linien des Sonnenspectrums werden Fraunhofer'sche Linien genannt, weil Fraunhofer sie zuerst (unabhängig von Wollaston) in größerer Anzahl beobachtete, ihre Lage gegen einander und gegen die Farben des Spectrums, sowie ihre Stärke feststellte und die hauptsächlichsten mit großen und kleinen Buchstaben des lateinischen Alphabetes benannte. Fraunhofer beobachtete etwa 500. Kirchhoff maß schon zwischen D und F mehr als 500 und gab ihre Abstände in Millimetern von einem beliebig gewählten Anfangspunkte, während sein Fortsetzer Hofmann die Messungen und Zeichnung bis auf mehr als 1600 brachte; Angström gab 1869 von vielen Linien die Wellenlänge des zugehörigen Lichtes in Zehnmilliontel Millimeter; nach jetzt gebräuchlicher Bezeichnung in $\mu\mu$ ist die Wellenlänge von $A = 760{,}1^{\mu\mu}$, $B = 686{,}9$, $C = 671{,}6$, $D_1 = 589{,}9$, $D_2 = 589{,}5$, $E = 526{,}9$, $F = 486{,}1$, $G = 430{,}7$, $H_1 = 396{,}8$, $H_2 = 393{,}3$. Diese Linien bilden einen der wichtigsten Gegenstände der neueren Physik; denn sie sind für uns der Schlüssel zur Erkenntniß des Wesens der Sonne und der Fixsterne. Sie bieten einen Anhalt zur genauen Bestimmung der Brechungsexponenten; denn da bei dieser Bestimmung ein Prisma angewendet wird, so erscheint der untersuchte Strahl als Spectrum, bietet also nur durch die Fraunhofer'schen Linien bestimmte, scharfe Visirpunkte für die Beobachtung mit dem Fernrohre dar (301.). Mit dem Taschenspectoskop von Steeg können die stärksten Fraunhofer'schen Linien ohne besonders nothwendige Vorbereitungen von Jedem wahrgenommen werden, indem man einfach das Rohr nach einer weißen Wolke richtet.

312 Das reine Sonnensp. hat nicht da seine Grenzen, wo es unserem Auge mit dem äußersten Roth zu beginnen und mit dem äußersten Violett zu endigen scheint; es gibt ultrarothe und ultraviolette Str.; die ersteren enthalten weniger als 400, die letzteren mehr als 800 Bill. Schw., die ersteren sind dunkle Wärmestr., die letzteren dunkle chemische Str. Daß die ultrarothen Str. keinen Lichteindruck hervorbringen, suchte man nach Versuchen von Brücke (1845) dadurch zu erklären, daß die Häute und Flüssigkeiten des Auges diese Str. absorbiren; spätere Versuche von Janssen (1860) und Franz (1862) machen diese Erklärung zweifelhaft, und lassen dann nur die Annahme zu, daß die Netzhaut für die ultrarothen Str. unempfindlich sei. Indessen, wenn das Auge auch neben dem blendenden Glanze des leuchtenden Sp. im ultrarothen und ultravioletten Theile keinen Lichteindruck wahrnimmt, so ist ein solcher Eindruck doch vorhanden, wenn man jenen blendenden Glanz beseitigt, wenn man den leuchtenden Theil des Sp. abblendet; der ultraviolette Theil erscheint dann lavendelgrau, von dem ultrarothen Theile erscheint ein kleines Stück noch schwach roth mit demselben Tone wie das benachbarte abgeblendete Roth. Die Wärmewirkung des ultrarothen Theiles prüft man durch feine Thermometer, am Besten durch eine Thermosäule (s. 496.); doch muß man hierbei das Sp. durch ein Steinsalzprisma erzeugen, weil Glas die dunkeln Wärmestr. absorbirt. Man findet dann die Wärmewirkung im ultrarothen Theile des Sp. viel größer als in dem leuchtenden Theile, und im ultravioletten Theile gleich Null. Man darf aber (nach Helmholtz) hieraus nicht schließen, daß in dem Sonnenlichte die dunkeln Wärmestr. in größerer Menge vorhanden seien, als irgend eine Art leuchtender Str.; die größere Wärmewirkung des ultrarothen Theiles kann davon herrühren, daß nach der mathematischen Theorie der Brechung die Str. in dem Sp. um so mehr zusammengedrängt werden, je größer ihre Wellenlänge ist, wodurch sich auch die größere Breite der höheren Farben im Sp. erklärt. Bis zu welchen Schwzn. herab die dunkeln Wärmestrahlen der Sonne gehen, ist noch nicht mit aller Bestimmtheit erforscht. Fizeau gibt für die äußersten ultrarothen Str. die Wellenlänge $1900^{\mu\mu}$, J. Müller $4800^{\mu\mu}$; nach der letzten Angabe wäre die Schwz. dieser Str. circa 60 Bill., wonach, da das äußerste Roth die Schwz. von 400 Bill. besitzt, fast 3 Octaven dunkler Wärmestr. gegen nur 1 Octave leuchtender Str. in dem Sonnenlichte vorhanden wären. Um die Wirkung des ultravioletten Spectraltheiles zu prüfen, muß man ein Quarzprisma anwenden, weil Glas diese Str. absorbirt; die chemische Wirkung derselben erfährt man aus der Menge von Chlor und Wasserstoff, die an den einzelnen Stellen des Sp. zu Salzsäure verbunden werden, oder an der Schwärzung von photographischem Papier, indem nach J. W. Draper (1837) die ultraviol. Str. die Silbersalze zersetzen; es ergibt sich dann, daß die chemische Wirkung schon bei der Linie E beginnt, rasch bis zur Linie H hin wächst und dann allmälig bis zum Ende des Sp. abnimmt. Noch deutlicher werden die chemischen Str. durch die Fluorescenz, d. i. die

Eigenschaft mancher Stoffe, bei besonders lebhaftem auftreffendem Lichte wie selbstleuchtend zu werden und ein Licht von veränderter Farbe auszustrahlen. Diese Eigenschaft zeigt in besonders hohem Grade eine Lösung von Chininsulfat; bringt man dieselbe in den ultravioletten Theil des Sp., so strahlt derselbe sofort ein lebhaftes farbiges Licht zurück, das wohl 1200 mal intensiver ist als das unveränderte Lavendelgrau im Ultraviolett. Da nach dem Princip der Erhaltung der Energie die leb. Kft. der Aetherschw. durch die Fluorescenz nicht vergrößert werden kann, und da die ultravioletten Str. nach Donders und Rees (1853) durch die Medien des Auges dringen können, so folgt aus der außerordentlich schwachen Sichtbarkeit des Lavendelgrau, daß die Netzhaut für die ultravioletten Str. fast unempfindlich ist. Helmholtz meint übrigens, daß das Lavendelgrau eine gemischte Empfindung sei, aus einem direct durch die ultravioletten Str. erzeugten schwachen Violett und einem durch Fluorescenz auf der Netzhaut hervorgerufenen Grünlichweiß. Bis zu welchen Schwzn. hinauf das Ultraviolett des Sonnensp. sich erstreckt, ist noch nicht absolut genau anzugeben; man hat die Wellenlänge von einzelnen Linien K bis U zu bestimmen gesucht, welche analog den Fraunhofer'schen Linien keine chemische Wirkung hervorbringen, und die Wellenlänge der letzten $= 295^{\mu\mu}$ gefunden, was einer Schwz. von etwa 1000 Bill. entsprechen würde; demnach wäre der Umfang der chemischen Str. noch nicht 1/2 Octave. Indessen ist doch das ultraviolette Sp. gewöhnlich sehr lang, fast so lang als das ultrarothe, das 3 Octaven umfaßt, was sich durch die schon erwähnte Theorie der Brechung erklärt.

Die ultrarothen Str. des Sonnenlichtes wurden von Herschel 1800 und die ultravioletten von Ritter 1801 entdeckt. Indessen beschränkt sich die thermische Wirkung nicht ausschließlich auf die ultrarothen, und die chemische Wirkung nicht ausschließlich auf die ultravioletten Str.; vielmehr erstreckt sich die thermische Wirkung, aber mit abnehmender Stärke, bis zu dem Ende des leuchtenden Spectrums und die chemische Wirkung beginnt schon, aber sehr schwach, im Orange. In Fig. 208 gibt die Linie abc die thermische und die Linie defg

Fig. 208.



die chemische Wirkungscurve; wie diese beiden Curven über dem Sp. steigen und fallen, so verhält es sich auch mit den beiden Wirkungen; das Maximum der Wärmewirkung b fällt hiernach tief ins Ultraroth, die chemische Wirkung hat 2 Maxima, 1 im Violett bei e und 1 im Ultraviolett bei f. Indessen gilt die Wärmecurve nur für ein Steinsalzprisma und die chemische für ein Quarzprisma; mit anderen Prismen haben die Curven einen ganz anderen Verlauf, ja können sogar ganz wegfallen, weil die Str. absorbirt werden; die chemische Curve ist sogar verschieden nach den Stoffen, welche der chemischen Wirkung ausgesetzt sind. Auch die Lichtwirkung ist durch die Curve hik graphisch dargestellt; es ist aus derselben ersichtlich, daß das Maximum der Lichtwirkung ins Gelb fällt, woraus sich der leuchtende Glanz der Rapsfelder erklärt. Um bei diesen Forschungen nicht von der Absorption gestört zu werden, müßte man von dem prismatischen Sp. ganz absehen; dasselbe kann durch das Beugungsgittersp. (371.) ersetzt werden, das auch dem Helmholtz'schen Einwurf gerecht würde. Jedoch haben nach Lord Rayleigh (1883) die Wirkungscurven nur dann einen wissenschaftlichen Werth, wenn als Abscissen die Logarithmen der Schwzn. aufgetragen werden. Ist das Beugungssp. in dieser Beziehung zutreffend, so ergeben die Curven von Langley (1881—3) andere Resultate, welche derselbe mit Hilfe seines **Bolometers** erhielt, das noch Temperaturdifferenzen von 1/50000° F. zu erkennen gestattet; nach Langleys Curven hat die Wärmewirkung der durch die Atmosphäre gegangenen Sonnenstr.

ihr Max. zwischen Gelb und Orange und verläuft auch sonst der Lichtwirkung proportional, während die chemische Wirkung von dem ausgesetzten Stoffe abhängt; die Wärmewirkung der Sonne an sich sei jedoch hiervon sehr verschieden, weil die Atm. eine auswählende, starke Absorption vollbringt, die insbesondere zunimmt, wenn die Wellenlänge abnimmt, was die Folgerung erheischt, daß das Sonnenlicht an sich blau ist, und was H. C. Vogel für die Sonnenatmosphäre selbst schon früher gefunden hatte. In Fig. 208 sind außer den hauptsächlichsten Fraunhofer'schen Linien in dem Lichtsp. auch die analogen Linien im Ultraviolett, chemisch wirkungslose Stellen, nach Müllers photographirtem Sp. angegeben; ebenso im Ultraroth Fizeaus kalte Linie, eine Stelle, welche nach Fizeau keine Wärmewirkung zeigt und nach Becquerel die Phosphorescenz nicht verlöscht, wie dies das übrige Ultraroth thut. Endlich ist noch ersichtlich, welche der angegebenen Fraunhofer'schen Linien an derselben Stelle mit den Spectralstreifen irdischer Elemente stehen; C und F fallen zusammen mit 2 Hauptlinien des Wasserstoffspectrums $H\alpha$ und $H\beta$, D mit der gelben Natriumlinie, b mit drei Magnesiumlinien. Näheres über Ultraroth und Ultraviolett bei der Spectralanalyse.

Obwohl Newton das Wesen des Lichtes nicht in Schw. fand, kam er doch zu der Idee der 7 Farben nur deßhalb, weil er eine Analogie der Spectralfarben mit der phrygischen Tonleiter — $1 : {}^9/_8 : {}^6/_5 : {}^4/_3 : {}^3/_2 : {}^5/_3 : {}^{16}/_9$ — herstellen wollte; denn ein gewöhnliches, unbefangenes Auge unterscheidet in dem Sp. wie in dem Regenbogen nur 5 Farben: Roth, Gelb, Grün, Blau und Violett. Helmholtz macht daher geltend, daß Goldgelb, Gelbgrün und Blaugrün dasselbe Recht wie Orange und Indigo hätten; auch wies er darauf hin, daß die 2 Endfarben Roth und Violett sich in ihrem Tone wieder einander nähern, und daß daher, wenn man zwischen Roth und Violett noch Purpur einschaltet, die Farbenreihe einen Kreis bildet, auf dem man von einem beliebigen Anfangspunkte durch allmälige Uebergänge zu demselben zurückkehren könne. — Unger benutzte (1852) dieses Purpur zu einer Farbentonleiter, aus welcher er nach den Principien der Harmonie der Töne eine Farbenharmonie ableitete, um eine Grundlage für die Aesthetik der Farben zu gewinnen; so bilden in seiner allerdings etwas erzwnngenen Farbentonleiter Roth, Grün und Violett den Dur-Dreiklang, wodurch sich die häufige Zusammenstellung dieser 3 Farben in den älteren, italienischen Gemälden erkläre, eine Erklärung, die Helmholtz bestreitet, da Roth, Grün, Indigo jenen Dreiklang bilde. — Listing stellte (1867) die Farbenoctave Braun (Ultraroth), Roth, Orange, Gelb, Grün, Cyan, Indigo, Lavendel auf und zeigte, daß die letzte Farbe doppelt soviel Schw. als die erste enthalte, und daß die Differenz je zweier auf einander folgenden Schwzn. immer dieselbe = 48 Bill. sei. Die Farbenskala bilde demnach eine arithmetische Reihe, während die Tonskala einer geometrischen nahekomme; die Wellenlängen der Farben nehmen nach einer harmonischen Progression ab, die der Töne nach einer geometrischen Reihe. — Wie die Farben sich hinsichtlich der Schwzn. unterscheiden, kann hier noch nicht berechnet werden; es möge einstweilen die Anführung genügen, daß Roth sich erstreckt von 400—470, Orange von 470—520, Gelb von 520—590, Grün von 590—650, Blau von 650—700, Indigo von 700—760, Violett von 760—800 Bill. Schw. Warum die Str. innerhalb der angegebenen Grenzen einen nahezu gleichen Eindruck auf das Auge hervorbringen, ist noch nicht erklärt (s. Farbentheorie 329.). — Die Farbenzerlegung des Lichtes durch Brechung erklärt den Regenbogen und die großen Höfe (s. Physik d. Luft 596. u. 597.).

313 **Die totale und die partielle Dispersion.** Das reine Spectrum ist für verschiedene Prismen aus derselben Substanz unter übrigens gleichen Umständen um so länger, je größer der brechende Winkel ist; die Breite der einzelnen Farbenstreifen nimmt in demselben Verhältnisse zu wie die Länge des ganzen Spectrums. Dies gilt jedoch nur für Prismen aus demselben Stoffe. Prismen von verschiedenem Stoffe erzeugen dagegen unter sonst gleichen Umständen Spectra von verschiedener Länge, haben also bei gleichem brechenden Winkel eine verschiedene Dispersion und bedürfen für gleiche Dispersion verschiedener brechenden Winkel. Man mißt die Dispersion durch die Differenz $n_v - n_r$, worin n_v den Brechungsexponent der äußersten violetten und n_r den der äußersten rothen Strahlen bezeichnet; man nennt diese Differenz die *totale Dispersion*; unter der *partiellen Dispersion* versteht man die Differenz der Brechungsexponenten zweier anderen Farben des Spectrums. Die totale Dispersion ist im Allgemeinen größer bei stärker brechenden Substanzen, aber durchaus nicht dem Brechungsexponent proportional; ebenso ist die partielle Dispersion weder der totalen, noch dem Brechungsexponent proportional.

Bei gleichen brechenden Winkeln dispergirt das Flintglasprisma stärker als ein Wasserprisma, es erzeugt ein 3 mal so langes Sp. als dieses, das Roth ist im ersteren 2,5, das

Gelb 2,8, das Violett 4 mal breiter als im letzteren. Wenn man nun den brechenden Winkel des Wasserprismas so vergrößert, bis das Wassersp. dieselbe Länge wie das Flintglassp. besitzt, so hat das erstere eine stärkere Ablenkung, Roth, Gelb und Orange haben eine größere und Violett eine kleinere Ausdehnung in diesem als im Flintglassp.; hierin ist die Unregelmäßigkeit deutlich ausgesprochen. Wir stehen hier wieder vor dem noch ganz unbekannten Einflusse der materiellen Verschiedenheit.

Der Achromatismus (Euler 1747, Dollond 1757). Betrachtet man eine weiße Fläche durch ein Prisma, so erscheint dieselbe an der einen Seite mit einem gelbrothen, an der anderen mit einem blauvioletten Saume versehen, in der Mitte aber weiß. Um die farbigen Säume zu beseitigen, müßte man mit dem Prisma ein zweites aus gleichem Stoffe und mit gleichem brechenden Winkel so verbinden, daß die brechenden Winkel in entgegengesetzter Richtung liegen, da dann die Dispersion des einen Prismas durch die gleiche und entgegengesetzte des anderen aufgehoben wird und die farbigen Strahlen dann nicht mehr divergent, sondern parallel austeten. In diesem Falle wird aber nicht blos die Dispersion, sondern auch die Ablenkung aufgehoben. Wenn die letztere Wirkung nicht erzielt werden soll, wenn noch eine Ablenkung vorhanden sein, die Dispersion aber gleich Null werden soll, so müssen die zwei Prismen gleich lange Spectra, aber verschiedene Ablenkungen bewirken; dies ist durch Verbindung zweier Prismen von verschiedenem Stoffe möglich, da solche Prismen bei gleichen brechenden Winkeln verschiedene Dispersionen und verschiedene Ablenkungen hervorbringen, die Dispersionen sich jedoch nicht den Ablenkungen proportional ändern. Läßt man den brechenden Winkel des Prismas mit kleinerer Dispersion so lange zunehmen bis ihre Spectra gleich sind, so heben sich die Dispersionen auf, die Ablenkungen aber nicht. Ein solches Prisma, aus zwei verschiedenen Prismen zusammengesetzt, das noch Ablenkung aber keine Dispersion besitzt, heißt *achromatisches Prisma*, und seine Eigenschaft, sowie die ganze Erscheinung wird *Achromatismus* oder *Achromasie* genannt.

314

Aus den Gesetzen der prismatischen Ablenkung läßt sich die Größe des brechenden Winkels B′ berechnen, der entgegengesetzt mit dem brechenden W. B verbunden, die Dispersion aufhebt. Bekanntlich ist (300.) $\sin\alpha' = n \sin\beta' = n \sin(B - \beta) = n(\sin B \cos\beta - \cos B \sin\beta)$ und $\sin\beta = {}^1/_n \cdot \sin\alpha$; $\cos\beta = \sqrt{(1 - \sin^2\beta)} = {}^1/_n \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)}$, woraus durch Substitution $\sin\alpha' = \sin B \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)} - \cos B \sin\alpha$. Bezeichnen wir nun mit n_r, n_v, n'_r, n'_v die B.-E. der äußersten rothen und violetten Str. in beiden Prismen, mit α'' den Austrittswinkel aus dem zweiten Prisma, während α den Einfallsw. ins erste und α' den Austrittsw. aus dem ersten und den Einfallsw. ins zweite bezeichnet, so ist für die violetten und die rothen Str. im zweiten Prisma bezüglich:

$$\sin\alpha''_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \cos B' \sin\alpha'_v$$

$$\sin\alpha''_r = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)} - \cos B' \sin\alpha'_r.$$

Wenn die Dispersion schließlich = Null sein soll, so müssen die rothen und die violetten Str. am zweiten Prisma denselben Austrittsw. haben, es muß $\sin\alpha''_v = \sin\alpha''_r$ sein, daher

$$\sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \cos B' \sin\alpha'_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)} - \cos B' \sin\alpha'_r$$

oder $$\tang B' \{\sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)}\} = \sin\alpha'_v - \sin\alpha'_r.$$

Setzen wir für $\sin\alpha'$ auf der rechten Seite den vorher gefundenen Werth, so ergibt sich

$$\tang B' = \frac{\sqrt{(n^2_v - \sin^2\alpha)} - \sqrt{(n^2_r - \sin^2\alpha)}}{\sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)}} \sin B.$$

Hieraus kann man B′ berechnen; ist z. B. für ein Crownglasprisma $B = 60$, $n_v = 1{,}55$, $n_r = 1{,}53$, für ein Flintglasprisma $n'_v = 1{,}67$, $n'_r = 1{,}63$, so ergibt sich $B' = 29^0$, vorausgesetzt, daß $\alpha = 50^0$. Die Größe der bleibenden Ablenkung läßt sich nach der Fl. $A = \alpha' + \alpha'' - B'$ berechnen. Natürlich findet hier der Achromatismus nur unter der Voraussetzung $\alpha = 50^0$ statt, aber auch in diesem Falle ist er nicht absolut, weil die partiellen Dispersionen den totalen nicht proportional sind, also mit der Aufhebung der letzteren nicht vollkommen verschwinden. Auch *die Linsenbilder* haben farbige Säume; denn aus der Fl. ${}^1/b + {}^1/d = (n - 1)({}^1/r + {}^1/r')$ folgt für die violetten Str. ein anderes und zwar ein kleineres b als für die rothen, da die Brechung nach dem Violett hin immer mehr zunimmt und daher $n_v > n_r$ ist. Es läßt sich dies durch den Versuch nachweisen, daß man ein Strahlenbündel durch eine Linse gehen läßt und den auf der anderen Seite entstehenden

Lichtkegel auf einen Schirm treffen läßt; das kreisförmige Bild hat diesseits der mittleren Brennweite einen violetten, jenseits einen rothen Saum. Diese farbigen Säume zu beseitigen, ist eine der wichtigsten Aufgaben der praktischen Optik. **Achromatische Linsen** werden analog den achromatischen Prismen hergestellt, indem man mit einer biconvexen Linse eine biconcave von gleicher Dispersion aber anderer Ablenkung verbindet, deren Brennweite in ähnlicher Weise wie oben der brechende Winkel zu berechnen ist.

315 **Die Spectral-Analyse** (Bunsen und Kirchhoff 1860). 1. **Eintheilung und Erklärung der Spectra.***) Die Spectral-Analyse ist die Lehre von der Beschaffenheit der Spectra aller lichtgebenden Körper. Man theilt die Spectra in 2 Klassen, Emissionsspectra und Absorptionsspectra; erstere entstehen durch das Licht, wie es von den Lichtquellen emittirt wird, letztere durch das Licht, das nach der Emission noch durch andere Körper gegangen und so theilweise absorbirt worden ist; die drei ersten von den folgenden 5 Arten sind Emissionsspectra, die 2 letzten Absorptionsspectra:

1. Das **continuirliche Spectrum** ist ein farbiges Band, dessen Farben ohne Unterbrechung in einander übergehen und nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch das Licht selbstleuchtender festen und flüssigen Körper.

2. Das **Streifen- oder Linienspectrum** besteht aus einzelnen farbigen Streifen oder Linien, die nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch die Schw. der Atome elementarer Dämpfe und Gase, die in starker Verdünnung oder bei hoher Temp. leuchten. Jedes andere Gas, jeder andere Dampf hat ein anderes Streifenspectrum; man kann daher ein Gas mittels seiner Spectralstreifen erkennen; das Streifenspectrum dient vorwiegend zur Spectralanalyse. Bei starker Verdichtung, hohem Drucke wird das Streifenspectrum der Dämpfe und Gase continuirlich.

3. Das **Bandenspectrum** besteht aus breiten Farbenstreifen, die an Lichtstärke ab- und zunehmen und nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch die Schw. der Moleküle gas- oder dampfförmiger Elemente und chemischer Verbindungen, die in weniger hoher Temperatur und Verdünnung leuchten.

4. Das **Absorptionslinienspectrum** ist ein solches Spectrum, dessen Continuität durch dunkle Linien unterbrochen ist. Es entsteht durch allfarbiges Licht, das durch eine weniger helle Gas- oder Dampfhülle gegangen ist; die dunkeln Linien stehen an den Stellen, an welchen das Spectrum des Gases helle Linien enthalten würde, wenn das Gas alleinleuchtend wäre. Man kann daher an den Linien die Elemente der Gashülle erkennen (324.).

5. Das **Absorptionsbandenspectrum** ist ein solches Spectrum, dessen Continuität von breiten, dunkeln Banden oder Feldern unterbrochen ist; es entsteht durch allfarbiges Licht, welches durch feste oder flüssige Körper gegangen oder von solchen reflectirt worden ist (323. u. 325.).

ad 1. Feste und flüssige Körper enthalten im weißglühenden Zustande alle nur denkbaren Schwzn. zwischen 100 bis 1000 Bill. Schw., strahlen daher alle nur denkbaren Farben von Roth bis Violett aus, so daß in dem farbigen Band keine Lücke entstehen kann; ein weißglühender Platindraht, weißglühende Kohle u. s. w. geben also ein continuirliches Sp.; im Sp. eines gelbglühenden Körpers fehlt das blauviolette Ende, das Sp. der Rothgluth geht nur bis zum Orange. Da die gewöhnlichen Feuer- und Lichtflammen ihre Leuchtkraft von den festen Kohlentheilchen erhalten, die in dem aufsteigenden heißen Gasstrome glühend schweben, so haben auch sie ein continuirliches Sp., je nach der Farbe der Gluth mehr oder weniger vollständig. In der Natur ist im Regenbogen das cont. Sp. durch die Tropfen gebildet fertig vorhanden; der Apparat zeigt es uns an den Kometen. Merkwürdige Ausnahmen bilden nach Bahr und Bunsen (1866) das Erbin und das Didymphosphat, indem dieselben im glühenden Zustande ein Streifen- oder Bandensp. geben. Nach Thalen (1880) gesellt sich zu diesen das Thulinmoxyd; nach Crookes (1881) haben auch Rubin,

*) Bei der Umarbeitg. dieses Abschnittes benutzte ich besonders: H. Kayser, Lehrb. der Spect.-Analyse.

amant u. a. Stoffe ein discont. Sp., wenn sie im Vacuum durch das dunkle Kathoden-
it oder „die strahlende Materie" phosphoresciren.

ad 2. Glühende Dämpfe und leuchtende Gase enthalten nur eine begrenzte Anzahl
n Schwzn., da die Atome innerhalb eines Mol. gegeneinander nur wenig verschiedene
zen haben können; sie strahlen daher nur ein Gemisch von wenigen Farben aus; geht
solches Strahlengemisch durch einen schmalen rechteckigen Spalt, dann durch ein Prisma,
kann das rechteckige Strahlenbündel nur in wenige farbige Bündel von gleicher Form
legt werden; folglich wird man, wenn das aus dem Prisma tretende Licht in ein Fern-
hr oder direct ins Auge geleitet wird, nur wenige Streifen von der Form des rechteckigen
paltes wahrnehmen; also besteht das Sp. der leuchtenden Gase und glühenden Dämpfe
s farbigen Streifen. Jedoch ist diese Folgerung nur dann giltig, wenn die Mol. weit
neinander entfernt sind und nur wenige At. enthalten, also in sehr verdünntem Zustande
d bei hoher Temp. Denn in dichten Gasen und Dämpfen, deren Mol. bei niedriger
mp. zahlreiche Atome enthalten, finden unaufhörlich Zusammenstöße der Mol. statt, und
werden die zahlreichen Atome in alle nur denkbaren Schwzn. versetzt, wodurch ein con-
uirliches Sp. entsteht. In verdünnten Gasen und Dämpfen aber sind die Mol. weit
neinander entfernt, die Zusammenstöße also selten, und bei hoher Temp. sind die Mol.
rch die Dissociation nur aus wenigen Atomen gebildet; folglich können nicht viele ver-
iedene Schwzn. entstehen, und die Atome haben Zeit, die Schwzn., auf welche sie abge-
mmt sind, auszubilden; es entstehen nur wenige, aber andauernde, völlig bestimmte Far-
n, also auch im Sp. nur scharf abgegrenzte Streifen oder Linien. In der Natur zeigen
s das Liniensp. die Protuberanzen und die Chromosphäre der Sonne, die hell aufblitzen-
n Fixsterne und die nicht auflöslichen Nebelflecken, der elektrische Funke und der Linienblitz,
s Nordlicht und das Zodiakallicht.

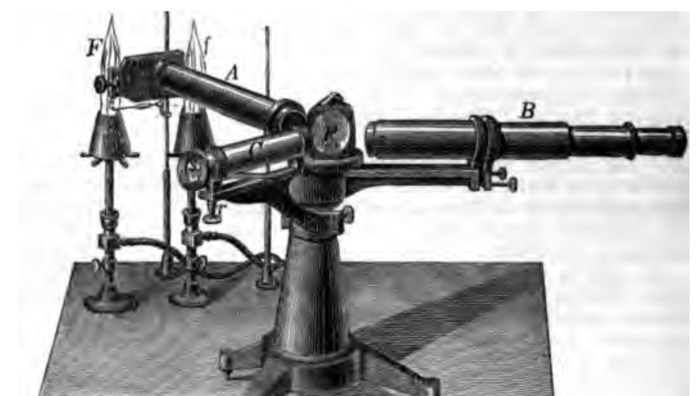
ad 3. Die Dämpfe und Gase der chemischen Verbindungen enthalten durchschnittlich
hr Atome in ihren Mol., als die der Elemente; jedoch enthalten auch diese bei wenig
her Temp. mehr Atome in ihren Mol. als bei der höchsten Temp.; bei geringer Dichte
ben diese zahlreichen Atome zwischen den Zusammenstößen der Mol. Zeit genug, ihre
genschwingungen auszubilden. Vielleicht bestehen nun die kleinsten Dampftheilchen oder
rtikel, wie auch die Eigenschaften des gesättigten Dampfes anzunehmen gebieten, aus
uppen von mehreren Mol., von denen jedes auf bestimmte Schwzn. abgestimmt ist; die
ßersten Atome jedes Mol. können diese Schwz. ungehindert ausführen, die inneren aber
ßen gegen andere Atome, vollenden ihre Schw. nicht und erhöhen so ihre Schwz.; und
s um so mehr, je weiter sie nach innen liegen, weil hier die Abstände der Atome immer
iner werden; aus demselben Grunde wird aber auch die Amplitude der Schw. immer
iner und mit ihr die Intensität der Farbe; so entsteht an einer Stelle des Sp. ein hell-
rbiger Streifen, nahe dabei nach dem Violett zu ein zweiter etwas weniger hell und breit,
d immer neue feinere Streifen lagern sich in immer größerer Entf. von einander an,
s endlich die höherzahligen Schw. eines anderen Mol. wieder mit einem breiteren und
leren Streifen beginnen und die ganze Erscheinung wiederholen. Diese allmälig immer
ner werdenden und immer weiter von einander entfernten farbigen Linien bilden den Ein-
uck großer, allmälig abnehmender Helligkeit im farbigen Sp., die Erscheinung eines breiten
schattirten Streifens oder Bandes, die sich wohl so vielmal wiederholt, als das Partikel
ol. enthält, wodurch das Bandenspectrum erklärlich scheint. Da die Mol. und Atome
r Elementenpartikel einander gleich sind, so werden auch die Banden einander gleich und
r regelmäßig sein; so sind die Bandensp. des Stickstoffs und des Schwefels sehr regel-
äßig, während die der Verbindungen sowohl in den Banden verschieden als in der Ab-
attirung unregelmäßig erscheinen; beim Schwefelsp. ist die Abschattirung nach dem Roth
n gerichtet, was sich wohl aus einer anderen Bildung der Mol. erklärt. Das regelmäßige
andensp. der elementaren Gase und Dämpfe macht durch seine Schattirung den Eindruck
n Säulenkannelirung und heißt daher auch kannelirtes Spectrum. Viele Verbin-
ngen werden durch die Hitze oder die elektrischen Funkenströme, welche zu ihrer Erleuch-
ng nöthig sind, zersetzt und erzeugen daher in diesen Fällen kein Bandensp.; da jedoch
ch Kirchhoffs Gesetz (324.) die Absorption der Emission gleich ist, so läßt sich aus der
ldung des Absorptionsbandensp. auch die des Emissionsbandensp. finden. In der Natur
en wir das Bandensp. in den Kometen, im Büschellichte und den Flächenblitzen.

ad 4 u. 5. Wir haben die Absorptionsspectren der Vollständigkeit wegen angeführt;
ch kann ihre Entstehung erst nach der Betrachtung der Absorption verstanden werden.
as Absorptionsliniensp. nennt man jetzt auch elective Absorption, das Absorptionsban-
nsp. allgemeine Absorption. In der Natur sind die Spectra der Sonne und der Fixsterne
sorptionslinienspectra, die der Planeten und des Mondes Absorptionsbandenspectra; die
zteren ergeben auch alle Körperfarben, wenn ihr Licht zur Erzeugung eines Sp. ausreicht.

316 2. **Herstellung der Spectra.** Hierzu gehört die Kenntniß der Spectral-Apparate oder Spectroskope und die Kenntniß der Methoden, die Stoffe in leuchtende Dämpfe oder Gase zu verwandeln. Da in letzter Zeit durch die Spectra im Ultraroth und Ultraviolett der Wissenschaft und Technik neue Gebiete eröffnet wurden, so gehören hierher auch die Methoden, die unsichtbaren Linien, Banden oder continuirlichen Abtheilungen wahrnehmbar zu machen.

a. **Die Spectroskope.** Der einfachste Spectral-App. ist der von Mousson (1861); er besteht (Fig. 206) aus einem innen geschwärzten Rohre, das an einem Ende eine Spaltvorrichtung trägt, während am anderen Ende hinter einer schiefen, dunkeln, durchbrochenen Metallschlußplatte das Prisma sitzt; er hat nur geringe Dispersion, die Linien sind schmal und nahe beisammen; jedoch ist er der einfachen Handhabung wegen für Schulversuche geeignet, wobei nur das nothwendige, schiefe Einblicken stört. Für den chemischen Gebrauch vollendet, erschien sogleich mit der Erfindung **Bunsens und Kirchhoffs Spectral-Apparat** (Fig. 209). Derselbe besteht außer dem Prisma P aus drei Röhren, dem Kolli-

Fig. 209.



matorrohr A, dem Fernrohr B und dem Skalenrohr C. Der Kollimator hat am entfernten, der Flamme zugewandten Ende eine Spaltvorrichtung, deren Constr. aus Fig. 210 zu ersehen ist; mittels der Schraube kann der Spalt nun nach Bedarf breiter oder enger gemacht werden. Am anderen, vorderen Ende des Rohres befindet sich eine Sammellinse, deren Brennweite gleich ihrer Entf. vom Spalt ist, so daß die vom Spalt divergirenden Strahlen parallele Richtung erhalten und aus der Linse tretend ein Bündel vom Querschnitt des Spaltes bilden. Nachdem dasselbe durch das Prisma gegangen, dispergirt und abgelenkt ist, hat es die Richtung des Fernrohrs B; dasselbe erzeugt durch sein Objectiv nach der zweiten Linsenregel nahe am Brennpunkt ein umgekehrtes Bild der Vorderfläche des dispergirten Strahlenbündels, das durch das Ocular als Lupe vergrößert gesehen wird; so erscheint das Sp. vergrößert, ohne undeutlich geworden zu sein. Um in demselben zum Messen geeignete feste Punkte herzustellen, befindet sich in dem Rohre C bei S eine durchsichtige Skala, die von außen durch eine Flamme beleuchtet ist, und deren durch eine Linse parallel gemachte Str. von der Vorderfläche des Prismas in das Fernrohr reflectirt und so mit dem Spectralbündel in das Auge gelangen, wodurch dieses die Theilstriche an verschiedenen Stellen des Sp. sieht. An der Spaltvorrichtung (Fig. 210) sieht man noch das Vergleichprisma ab, das durch totale Refl. Str. einer anderen Flamme in den Kollimator läßt, so daß man die Linien des in

Fig. 210.



Gelb 2,8, das Violett 4 mal breiter als im letzteren. Wenn man nun den brechenden Winkel des Wasserprismas so vergrößert, bis das Wassersp. dieselbe Länge wie das Flintglassp. besitzt, so hat das erstere eine stärkere Ablenkung, Roth, Gelb und Orange haben eine größere und Violett eine kleinere Ausdehnung in diesem als im Flintglassp.; hierin ist die Unregelmäßigkeit deutlich ausgesprochen. Wir stehen hier wieder vor dem noch ganz unbekannten Einflusse der materiellen Verschiedenheit.

314 **Der Achromatismus** (Euler 1747, Dollond 1757). Betrachtet man eine weiße Fläche durch ein Prisma, so erscheint dieselbe an der einen Seite mit einem gelbrothen, an der anderen mit einem blauvioletten Saume versehen, in der Mitte aber weiß. Um die farbigen Säume zu beseitigen, müßte man mit dem Prisma ein zweites aus gleichem Stoffe und mit gleichem brechenden Winkel so verbinden, daß die brechenden Winkel in entgegengesetzter Richtung liegen, da dann die Dispersion des einen Prismas durch die gleiche und entgegengesetzte des anderen aufgehoben wird und die farbigen Strahlen dann nicht mehr divergent, sondern parallel austeten. In diesem Falle wird aber nicht blos die Dispersion, sondern auch die Ablenkung aufgehoben. Wenn die letztere Wirkung nicht erzielt werden soll, wenn noch eine Ablenkung vorhanden sein, die Dispersion aber gleich Null werden soll, so müssen die zwei Prismen gleich lange Spectra, aber verschiedene Ablenkungen bewirken; dies ist durch Verbindung zweier Prismen von verschiedenem Stoffe möglich, da solche Prismen bei gleichen brechenden Winkeln verschiedene Dispersionen und verschiedene Ablenkungen hervorbringen, die Dispersionen sich jedoch nicht den Ablenkungen proportional ändern. Läßt man den brechenden Winkel des Prismas mit kleinerer Dispersion so lange zunehmen bis ihre Spectra gleich sind, so heben sich die Dispersionen auf, die Ablenkungen aber nicht. Ein solches Prisma, aus zwei verschiedenen Prismen zusammengesetzt, das noch Ablenkung aber keine Dispersion besitzt, heißt *achromatisches Prisma*, und seine Eigenschaft, sowie die ganze Erscheinung wird *Achromatismus* oder *Achromasie* genannt.

Aus den Gesetzen der prismatischen Ablenkung läßt sich die Größe des brechenden Winkels B' berechnen, der entgegengesetzt mit dem brechenden W. B verbunden, die Dispersion aufhebt. Bekanntlich ist (300.) $\sin\alpha' = n \sin\beta' = n \sin(B - \beta) = n(\sin B \cos\beta - \cos B \sin\beta)$ und $\sin\beta = \frac{1}{n} \cdot \sin\alpha$; $\cos\beta = \sqrt{(1 - \sin^2\beta)} = \frac{1}{n}\sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)}$, woraus durch Substitution $\sin\alpha' = \sin B \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)} - \cos B \sin\alpha$. Bezeichnen wir nun mit n_r, n_v, n'_r, n'_v die B.-E. der äußersten rothen und violetten Str. in beiden Prismen, mit α'' den Austrittswinkel aus dem zweiten Prisma, während α den Einfallsw. ins erste und α' den Austrittsw. aus dem ersten und den Einfallsw. ins zweite bezeichnet, so ist für die violetten und die rothen Str. im zweiten Prisma bezüglich:

$$\sin\alpha''_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \cos B' \sin\alpha'_v$$

$$\sin\alpha''_r = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)} - \cos B' \sin\alpha'_r.$$

Wenn die Dispersion schließlich = Null sein soll, so müssen die rothen und die violetten Str. am zweiten Prisma denselben Austrittsw. haben, es muß $\sin\alpha''_v = \sin\alpha''_r$ sein, daher

$$\sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \cos B' \sin\alpha'_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)} - \cos B' \sin\alpha'_r$$

oder $\tan B' \{\sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)}\} = \sin\alpha'_v - \sin\alpha'_r$.

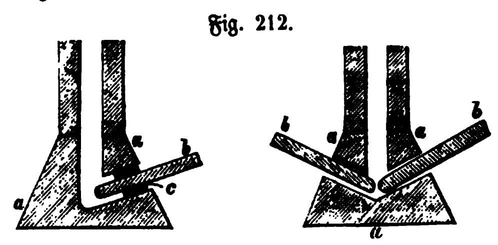
Setzen wir für $\sin\alpha'$ auf der rechten Seite den vorher gefundenen Werth, so ergibt sich

$$\tan B' = \frac{\sqrt{(n^2_v - \sin^2\alpha)} - \sqrt{(n^2_r - \sin^2\alpha)}}{\sqrt{(n'^2_v - \sin^2\alpha'_v)} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2\alpha'_r)}} \sin B.$$

Hieraus kann man B' berechnen; ist z. B. für ein Crownglasprisma $B = 60$, $n_v = 1{,}55$, $n_r = 1{,}53$, für ein Flintglasprisma $n'_v = 1{,}67$, $n'_r = 1{,}63$, so ergibt sich $B' = 29^\circ$, vorausgesetzt, daß $\alpha = 50^\circ$. Die Größe der bleibenden Ablenkung läßt sich nach der Fl. $A = \alpha' + \alpha'' - B'$ berechnen. Natürlich findet hier der Achromatismus nur unter der Voraussetzung $\alpha = 50^\circ$ statt, aber auch in diesem Falle ist er nicht absolut, weil die partiellen Dispersionen den totalen nicht proportional sind, also mit der Aufhebung der letzteren nicht vollkommen verschwinden. Auch die *Linsenbilder* haben farbige Säume; denn aus der Fl. $\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = (n - 1)(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'})$ folgt für die violetten Str. ein anderes und zwar ein kleineres b als für die rothen, da die Brechung nach dem Violett hin immer mehr zunimmt und daher $n_v > n_r$ ist. Es läßt sich dies durch den Versuch nachweisen, daß man ein Strahlenbündel durch eine Linse gehen läßt und den auf der anderen Seite entstehenden

Luft uns davon Kunde gab; hiermit ist die ungemeine Empfindlichkeit der Spectral-Analyse schon angedeutet. Ein Lithiumsalz erzeugt eine pfirsichblüthrothe Spectrallinie, zwischen der rothen Ka- und der gelben Na-Linie. Ein Strontiumsalz bildet mehrere rothe, einen orangefarbigen und einen blauen Streifen. Leicht ersichtlich ist hiernach, wie die Sp.-A. dieser Dämpfe geschieht. Nicht verwendbar ist diese Methode für die schweren Metalle, da deren Salze sich hier nicht zersetzen; unzuverlässig ist sie schon für Ba und Sr, da diese Metalle sich in der Flamme oxydiren und so die Bandenspectra der Oxyde bilden, allerdings neben den Hauptlinien der Metalle. Ungestörter von den Banden der Oxyde erhält man die Linien, wenigstens die des Sr und auch manche des Ba in der viel heißeren Flamme des Knallgasgebläses, deren Temp. fast 3000° erreicht, sicherer aber in dem elektrischen Kohlenbogenlicht, dessen Temp. nach Rosetti (1879) 4—5000° beträgt; auch die Sp. vieler anderen Metalle lassen sich mittels desselben wahrnehmen. Die beiden Kohlenstifte oder Elektroden desselben werden vertikal über einander aufgestellt, der positive oben, der negative unten; da letzterer von selber eine Grube erhält, so legt man in diese ein Stückchen des Salzes oder Metalls; durch das Kohlenlicht wird der leuchtende Dampf hergestellt. In ihren großartigen Untersuchungen seit 1879 haben Liveing und Dewar besondere Einrichtungen für die Benutzung des el. Bogenlichtes getroffen, von denen zwei in Fig. 212 dargestellt sind: a ist ein Kohlenblock, b sind Kohlenstifte, die durch Kalkpfropfen c von a isolirt sind; wird a (links) mit dem einen und b mit dem anderen Pol einer magnetelektrischen Maschine verbunden, oder die beiden Stifte b (rechts) mit beiden Polen, so entsteht im Grunde der abwärts gehenden Röhre ein starkes Bogenlicht, welches ein durch die Röhre herabgesenktes Metallstück verdampft oder ein Salz zersetzt und so die Linien erzeugt; jedoch sind diese Einrichtungen mehr für die Absorptionsspectra geeignet, da das Kohlenlicht bald von einer weniger heißen Dampfschicht eingehüllt ist. Auch wird man, selbst bei der obigen alten Einrichtung, durch das cont. Sp. des Bogenlichtes gestört, weßhalb die elektrische Entladung vorzuziehen ist.

Fig. 212.



Die elektrische Entladung kann in mehrfacher Weise gleichzeitig zur Erzeugung und Erleuchtung von Metalldämpfen, sowie auch zur Erleuchtung von Gasen verwendet werden. Man benutzt hierzu den Funkenstrom des Rhumkorff'schen Inductors oder der Influenzmaschinen von Holtz oder Töpler. Die Metalldämpfe erhält man am einfachsten, wenn man die Elektroden dieser Apparate aus dem betreffenden Metall herstellt und zwischen ihren Enden den Funkenstrom überspringen läßt; es werden dann unaufhörlich Atome oder Mol. des Metalls von den Elektroden losgerissen und durch die hohe Temp. des el. Funkens in Gluth versetzt, wodurch leuchtender Metalldampf entsteht. Die Temp. des Rhumkorff'schen Funkenstromes wird gesteigert durch eine kräftigere Batterie, dann je nach der Beschaffenheit des Metalls und der Entf. der Elektroden durch Anwendung einer Spule aus zahlreichen Windungen dünnen Drahtes anstatt einer Spule aus weniger Windungen dicken Drahtes, indem erstere Funken von großer Spannung, letztere von großer Quantität der El. erzeugt; auch können in den Schließungsbogen eine oder mehrere Leydener Flaschen eingeschaltet werden, wodurch die Temp. den höchsten Grad erreicht; beim Holtz'schen Funkenstrom geschieht auch das letztere, jedoch wird die Temp. noch höher gesteigert durch Einschaltung einer Luftstrecke. Auch Salze oder Salzlösungen geben auf diese Weise leuchtende Dämpfe, indem man die Enden von Platinelektroden mit ihnen bedeckt oder befeuchtet, oder die eine Elektrode in sie eintaucht und die andere der Oberfläche gegenüber hält, wozu unfehlbare Einrichtungen getroffen wurden. Allerdings sind hier die Metallspectra durch Luftlinien verunreinigt, indem der el. Funkenstrom auch die Gase zum Leuchten bringt; da die Luftlinien sich jedoch in allen Spectren wiederholen, so sind sie leicht zu eliminiren; auch ersetzt man die Luft durch andere Gase, die weniger Linien liefern, z. B. durch H, dies insbesondere dann, wenn Verbindungen der Metalle mit O zu befürchten sind; endlich folgt die Elektricität auch hier wie überall mehr den guten Leitern, erleuchtet also die Metalltheilchen mehr als die Lufttheilchen, so daß die Luftlinien meist nur schwach und wenig zahlreich auftreten. Auf diese Weise erhielt schon Kirchhoff die Hauptlinien von 32 Metallen, und maß genau die Stelle von fast 500 Linien auf seiner Skale; ihm folgte Huggins (1864), der durch einen Apparat mit 6 Prismen 960 Linien von 28 Elementen erhielt; Angström und Thalen gaben (1868) mit ihrem neuen Sonnensp. 792 Linien mit ihren Wellenlängen, da sie Gitterspectra benutzt hatten; Thalen behandelte die Elemente speciell und erhielt von 45 El. 1405 Linien mit Wellenlängen, die auf $^1/_{10}\,\mu\mu$ genau sind.

Diamant u. a. Stoffe ein discont. Sp., wenn sie im Vacuum durch das dunkle Kathodenlicht oder „die strahlende Materie" phosphoresciren.

ad 2. Glühende Dämpfe und leuchtende Gase enthalten nur eine begrenzte Anzahl von Schwzn., da die Atome innerhalb eines Mol. gegeneinander nur wenig verschiedene Lagen haben können; sie strahlen daher nur ein Gemisch von wenigen Farben aus; geht ein solches Strahlengemisch durch einen schmalen rechteckigen Spalt, dann durch ein Prisma, so kann das rechteckige Strahlenbündel nur in wenige farbige Bündel von gleicher Form zerlegt werden; folglich wird man, wenn das aus dem Prisma tretende Licht in ein Fernrohr oder direct ins Auge geleitet wird, nur wenige Streifen von der Form des rechteckigen Spaltes wahrnehmen; also besteht das Sp. der leuchtenden Gase und glühenden Dämpfe aus farbigen Streifen. Jedoch ist diese Folgerung nur dann giltig, wenn die Mol. weit voneinander entfernt sind und nur wenige At. enthalten, also in sehr verdünntem Zustande und bei hoher Temp. Denn in dichten Gasen und Dämpfen, deren Mol. bei niedriger Temp. zahlreiche Atome enthalten, finden unaufhörlich Zusammenstöße der Mol. statt, und es werden die zahlreichen Atome in alle nur denkbaren Schwzn. versetzt, wodurch ein continuirliches Sp. entsteht. In verdünnten Gasen und Dämpfen aber sind die Mol. weit voneinander entfernt, die Zusammenstöße also selten, und bei hoher Temp. sind die Mol. durch die Dissociation nur aus wenigen Atomen gebildet; folglich können nicht viele verschiedene Schwzn. entstehen, und die Atome haben Zeit, die Schwzn., auf welche sie abgestimmt sind, auszubilden; es entstehen nur wenige, aber andauernde, völlig bestimmte Farben, also auch im Sp. nur scharf abgegrenzte Streifen oder Linien. In der Natur zeigen uns das Liniensp. die Protuberanzen und die Chromosphäre der Sonne, die hell aufblitzenden Fixsterne und die nicht auflöslichen Nebelflecken, der elektrische Funke und der Linienblitz, das Nordlicht und das Zodiakallicht.

ad 3. Die Dämpfe und Gase der chemischen Verbindungen enthalten durchschnittlich mehr Atome in ihren Mol., als die der Elemente; jedoch enthalten auch diese bei wenig hoher Temp. mehr Atome in ihren Mol. als bei der höchsten Temp.; bei geringer Dichte haben diese zahlreichen Atome zwischen den Zusammenstößen der Mol. Zeit genug, ihre Eigenschwingungen auszubilden. Vielleicht bestehen nun die kleinsten Dampftheilchen oder Partikel, wie auch die Eigenschaften des gesättigten Dampfes anzunehmen gebieten, aus Gruppen von mehreren Mol., von denen jedes auf bestimmte Schwzn. abgestimmt ist; die äußersten Atome jedes Mol. können diese Schwz. ungehindert ausführen, die inneren aber stoßen gegen andere Atome, vollenden ihre Schw. nicht und erhöhen so ihre Schwz.; und dies um so mehr, je weiter sie nach innen liegen, weil hier die Abstände der Atome immer kleiner werden; aus demselben Grunde wird aber auch die Amplitude der Schw. immer kleiner und mit ihr die Intensität der Farbe; so entsteht an einer Stelle des Sp. ein hellfarbiger Streifen, nahe dabei nach dem Violett zu ein zweiter etwas weniger hell und breit, und immer neue feinere Streifen lagern sich in immer größerer Entf. von einander an, bis endlich die höherzahligen Schw. eines anderen Mol. wieder mit einem breiteren und helleren Streifen beginnen und die ganze Erscheinung wiederholen. Diese allmälig immer feiner werdenden und immer weiter von einander entfernten farbigen Linien bilden den Eindruck großer, allmälig abnehmender Helligkeit im farbigen Sp., die Erscheinung eines breiten abschattirten Streifens oder Bandes, die sich wohl so vielmal wiederholt, als das Partikel Mol. enthält, wodurch das Bandenspectrum erklärlich scheint. Da die Mol. und Atome der Elementenpartikel einander gleich sind, so werden auch die Banden einander gleich und sehr regelmäßig sein; so sind die Bandensp. des Stickstoffs und des Schwefels sehr regelmäßig, während die der Verbindungen sowohl in den Banden verschieden als in der Abschattirung unregelmäßig erscheinen; beim Schwefelsp. ist die Abschattirung nach dem Roth hin gerichtet, was sich wohl aus einer anderen Bildung der Mol. erklärt. Das regelmäßige Bandensp. der elementaren Gase und Dämpfe macht durch seine Schattirung den Eindruck von Säulenkannelirung und heißt daher auch kannelirtes Spectrum. Viele Verbindungen werden durch die Hitze oder die elektrischen Funkenströme, welche zu ihrer Erleuchtung nöthig sind, zersetzt und erzeugen daher in diesen Fällen kein Bandensp.; da jedoch nach Kirchhoffs Gesetz (324.) die Absorption der Emission gleich ist, so läßt sich aus der Bildung des Absorptionsbandensp. auch die des Emissionsbandensp. finden. In der Natur sehen wir das Bandensp. in den Kometen, im Büschellichte und den Flächenblitzen.

ad 4 u. 5. Wir haben die Absorptionsspectren der Vollständigkeit wegen angeführt; doch kann ihre Entstehung erst nach der Betrachtung der Absorption verstanden werden. Das Absorptionsliniensp. nennt man jetzt auch electi**v**e Absorption, das Absorptionsbandensp. allgemeine Absorption. In der Natur sind die Spectra der Sonne und der Fixsterne Absorptionslinienspectra, die der Planeten und des Mondes Absorptionsbandenspectra; die letzteren ergeben auch alle Körperfarben, wenn ihr Licht zur Erzeugung eines Sp. ausreicht.

von Al geht bis 185 $\mu\mu$, von Ca bis 316, von Cd bis 214, von Fe von 407 bis 294, von Mg bis 279, von Mn bis 381, von Ni bis 299, von Ti bis 317, von Zn bis 202. Die bedeutenden Spectralforscher Liveing u. Dewar erklärten jedoch (1883) alle diese Forschungen für ungenügend zur Vergleichung der ultravioletten Linien mit bestimmten Grundpunkten, wie sie die Fraunhofer'schen Linien für das sichtbare Sp. bieten; sie benutzten als Lichtquellen das Bogenlicht einer starken dynamo-elektrischen Maschine und den Funkenstrom eines großen Inductors, entwarfen von den hierin entstehenden Eisen- und Kupferdämpfen ein Gitterspectrum auf einer photographischen Platte und erhielten so die Wellenlängen der Hauptlinien; die schwächeren Linien wurden im Anschlusse zu diesen durch Prismen aus Kalkspath und Quarz bestimmt. Von diesen Linien gaben sie in Tabellen die Intensität, Umkehrbarkeit und Wellenlänge bis zu Zehntel $\mu\mu$ an; die Eisenlinien wurden nur bis 232 benutzt, weil die höheren zu schwach für Bestimmungspunkte sind; von da folgen Kupferlinien bis 213. Durch Interpolation gegen diese Grundlinien bestimmten sie die Wellenlängen von 8 ultravioletten Linien des K, von 4 des Na, von 12 des Li, von 30 des Ba bis zu 230 $\mu\mu$, von 11 des Sr, von 32 des Ca (die 1. fällt mit H, die 5. mit K des Sonnensp. zusammen), von 1 des Hg, von 3 des Au, von 20 des Th, von 13 des Al, von 37 des Pb, von 45 des Sn, von 13 des Sb, von 22 des Bi und von 9 des Kohlenstoffs bis 234. — Zu einer so genauen Fixirung der Linien ist man im Ultraroth noch nicht gelangt, obwohl zur Beobachtung drei Mittel zu Gebote stehen, die Wärmewirkung, die Photographie und die Auslöschung der Phosphorescenz. Hinsichtlich der Wärmewirkung beschränkten sich die Forscher auf das Sonnensp.; indem sie eine lineare Thermosäule im Ultraroth verschoben, zeigten sie, daß es kalte Stellen im warmen Ultraroth gibt, daß also die Fraunhofer'schen Linien auch in diesem Theile des Sp. existiren; da nun diese Linien Umkehrungen der wirksamen Linien von Gasen und Dämpfen sind, so müssen dieselben auch für das Ultraroth existiren; auch Langley hat mit seinem Bolometer (1880—83) nur das Sonnensp. berücksichtigt (312.). Was die Photographie des Ultraroth anbelangt, so erkannte zuerst J. W. Draper (1842), daß auch dieser Spectraltheil photographisch wirkt, jedoch nur auf die Daguerre'sche jodirte Silberplatte, in welcher die thermisch wirkungslosen Stellen geschwärzt werden; hiernach gab auch Becquerel (1868) ein Bild von ultrarothen Linien des Sonnensp. Später fand Abney (1878) eine Bromsilber-Gelatine-Emulsion, welche für Ultraroth empfindlich ist und daher die gewöhnliche Photographie gestattet; jedoch beschränkte er sich bis jetzt auf die Herstellung eines ultrarothen Sonnensp., das bis zur Wellenlänge 2700 (?) reicht; um keine Verluste durch Absorption zu erfahren und die starke Verkleinerung des Ultraroth durch die prismatische Brechung zu vermeiden, construirte er (1880) einen photographischen Apparat, der nur aus Plan- und Hohlspiegeln besteht, das Sp. durch ein Gitter erzeugt, und so für die Photographie der ultrarothen Linien vielversprechend erscheint. Nachdem Abney und Festing (1881) noch entdeckt hatten, daß die ultrarothen Str. von 650 bis 1200 ungehindert durch eine dünne Ebonitplatte gehen, während diese sämmtliche farbigen Str. vernichtet, fanden Abney und Schuster (1882) bei der Sonnenfinsterniß vom 18. Mai, daß eine Protuberanz zwei ultrarothe Linien enthielt. Darnach construirte Pringsheim (1883) einen Apparat der Abney'schen Art, ließ aber die ultrarothen Str. auf ein Radiometer fallen; er fand die äußersten ultrarothen Str. = 1520 und unempfindliche Stellen bei 1370. Edmond Becquerel hatte bei seinen Phosphorescenzversuchen gefunden, daß das Ultraroth die Phosphorescenz auslöscht, daß also die Fraunhofer'schen Linien des Ultraroth diese nicht verlöschen; so ließ er (1876) das ultrarothe Sonnensp. auf eine phosphorescirende Tafel von Blende fallen, wodurch die Fraunhofer'schen Linien des Ultraroth leuchtend sichtbar wurden; nach diesem Versuch ging das Ultraroth bis 1220, nach einem (1882) von dem Sohne Henri B. angestellten Versuche bis 1444. Das starke Leuchten der neuen Phosphore, Balmain'schen Leuchtfarben machte diese genauere Untersuchung möglich. Henri B. benutzte dasselbe endlich auch zur Erforschung der wirksamen Spectrallinien der Metalldämpfe, indem dieselben die Phosphorescenz auslöschen, also als dunkle Linien auf der leuchtenden Balmain'schen Tafel erscheinen; für Mg, Al, Fe, Pb, Zn und Sn fand er wirksame Banden bis 820 und diffuse Gruppen bis 950. Scharf begrenzte Absorptions-Banden, die als Bestimmungspunkte dienen konnten, fand er für das Sonnensp. bei 930, 1082, 1230 und 1470, für das Didym bei 743, 796 und 872, für das Holmium bei 811. In einer weiteren Arbeit (1883) benutzte er dieselben, um die ultrarothen Linien von Metalldämpfen im Bogenlicht durch ein Schwefelkohlenstoffprisma zu finden. Für Na fand er 2 starke Linien 819 und 1098, von denen erstere mit einer Sonnenlinie zusammenfällt, für Mg 875, 1030 und 1130, die alle 3 mit solchen stimmen, für Ca 848, die ebenfalls der Sonne angehört, für K fünf Linien von 770 bis 1182, für Ag 2 Linien, für Th eine bei 1105; Sr u. Pb geben 6, Zn, Sn, Cd und Al Linien mit größeren Wellenlängen, die deßhalb noch nicht genau bestimmbar sind. — Bei der Benutzung eines empfindlicheren Phosphors (1884) gelang ihm die genauere Bestimmung bei den meisten Metallen bis und über 1200, bei der Sonne sogar bis 1880; Nickel und Eisen aber zeigten nur diffuse Gruppen.

Watts reducirte die früheren Zahlen (1872) auf Wellenlängen. Salet untersuchte (1873) besonders die mehrfachen Spectra der Metalloide, und Lecoq de Boisbaudran gab (1874) genaue Zeichnungen und Messungen der Linien von 45 Elementen. Das linienreichste Element ist das Eisen, indem es fast 1000 Spectrallinien gibt; zahlreich sind auch die Linien von Antimon, Barium, Blei, Brom, Calcium, Chlor, Mangan, Quecksilber, Selen, Strontium, Titan und Zink.

Die farblosen und durchsichtigen Gase, wie O, N, H werden mittels der *Geißler'schen Röhren* (530. 2) zum Leuchten gebracht; in sehr verdünntem Zustande sind sie in diese Röhren eingeschlossen, und gelangen zum Leuchten, wenn der el. Funkenstrom dauernd durch die Röhren geht. Das Leuchten entsteht nicht durch Gluth, wie man sich bisher vorstellte, da nach E. Wiedemann die Temp. in manchen Röhren unter 100° bleibt; vielmehr bringen die Aetherstürze des el. Funkenstromes die Atome in starke Schw., die sich wieder als farbiges Licht durch den Aether fortpflanzen; indessen können durch Verbindung starker Apparate mit Leydener Flaschen und Funkenstrecken in wenig verdünnten Gasen Temperaturen bis zu 80000° erreicht werden. Das Licht weiter Geißler'scher Röhren ist bei Tage nur im dunkeln Zimmer sichtbar, eignet sich daher wenig zur Spectral-Analyse; darum ist zur Erzeugung des Sp. ein Theil der Röhre capillardünn, wodurch die Temp. und die Lichtstärke erhöht werden. Richtet man auf eine solche mit H erfüllte Röhre ein Spectroskop, so sieht man (Plücker und Hittorf 1864) eine rothe Linie $H\alpha = 656^{\mu\mu}$, die mit der Fraunhofer'schen Linie C zusammenfällt, eine grüne Linie $H\beta = 486 = F$, eine blaue Linie $H\gamma = 434$ nicht weit von G; in neuester Zeit wurden noch 2 Linien gefunden, eine dunkelblaue $H\delta = 410 = h$ und eine violette $H\varepsilon = 397 = H$. Das O-Sp. hat 4 Linien im Orange, Gelb, Grün und Dunkelblau, die jedoch gewöhnlich durch Linien der 3 anderen O-Spectra gestört werden; das N-Sp. ist ein Bandenspectrum. Wie es Geißler'sche Röhren mit H, O oder N gibt, so enthalten andere alle nur möglichen Gase oder Dämpfe von Elementen oder Verbindungen, und sind häufig so eingerichtet, daß ein fester oder flüssiger Körper, der in einem seitlichen Theile angebracht ist, durch Erhitzen von außen oder durch den Funkenstrom verdampft und mit seinem Dampfe die Röhre erfüllt; es verschwindet dann gewöhnlich das Sp. des vorhandenen Gases und wird durch das des Dampfes ersetzt, vorausgesetzt, daß dieser den Strom besser leitet. Schließlich muß man beachten, daß die Dämpfe chemischer Verbindungen in den Röhren häufig durch den el. Funkenstrom zersetzt werden, weil dessen Aetherstürze die Atome in Schw. versetzen und daher auseinander treiben. So zeigt eine mit Wasserdampf erfüllte Röhre das H-Sp., weil H_2O in H und O zerlegt wird; eine Röhre mit Kohlensäure (CO_2) und eine andere mit Kohlenoxyd (CO) haben dasselbe Sp., weil CO_2 in CO und O zerlegt wird; die Röhren mit Kohlenwasserstoffgasen geben meist ein Kohlenstoff-Spectrum, und wenn sie mit O verunreinigt sind, auch das Kohlenoxyd-Spectrum.

318

2. c. *Die Wahrnehmung der ultravioletten und ultrarothen Linien der Gase und Dämpfe.* Wenn das Sonnensp. einen ultravioletten, chemisch wirksamen Theil und einen ultrarothen, thermisch wirkenden Theil hat, so liegt die Vermuthung nahe, daß auch die Spectra der Gase und Dämpfe ultraviolette und ultrarothe Spectralgebiete enthalten dürften; und da die wirksamen Stellen in dem sichtbaren Theile eines Sp. hauptsächlich Streifenform haben, so mögen auch die wirksamen Stellen in den unsichtbaren Theilen hauptsächlich Linien sein, womit jedoch Banden und continuirliche Partien nicht ausgeschlossen sind. Wenn es im Ultraviolett wirklich Linien sind, so müssen diese wegen ihrer chemischen Wirkung sich als Linien *photographiren* lassen; so hat schon Miller (1862) *ultraviolette Linien* von 28 Elementen photographisch hergestellt; doch sind die Sp. zu klein, um die Messung von Wellenlängen zu gestatten. Mascart erhielt (1866) durch Photographieen die Wellenlängen mancher ultravioletten Metallstreifen; das Cadmium-Sp. verfolgte er bis fast $200^{\mu\mu}$, während das Sonnensp. bald unter 300 abbricht; auch erzählt er von Individuen, die das Cadmium-Sp. bis zu jener Linie sehen konnten, was Soret (1883) durch eine Fluorescenz der Augenmedien erklärt. Da nach Stokes (1862) die ultravioletten Str. nicht bloß chemisch, sondern auch *fluorescirend* wirken, so gelang es Soret (1874), diese *unsichtbaren ultravioletten Linien leuchtend sichtbar* zu machen, indem er in dem Brennpunkte der Fernrohrlinse eine Platte von Uranglas oder ein Quarzgefäß mit Chinin, Aesculin oder Magdalaroth anbrachte (fluorescirendes Ocular). Schönn (1880) benutzte statt dessen eine durchscheinende Scheibe von chiningetränktem Pauspapier in einem Apparat, der nur Linsen und Prismen aus Quarz oder Kalkspath enthielt; er sah im ultravioletten Sp. von Cd, Zn und Th die Linien Millers, aber das Fe-Sp. 2½ mal so lang als dieser und aus zahllosen Linien zusammengesetzt, im Sp. von Ca 2 helle Doppellinien, von Jn 8, Mn 17, von Al zahlreiche Linien. Die photographische Methode bildete Cornu (1881) zu großer Genauigkeit aus; in seinem „normalen Sonnensp." gab er zahllose Linien des Ultraviolett mit den Wellenlängen bis zu Zehntel Mimi genau und setzte unter dasselbe die ultravioletten Linien der Metalldämpfe; sein Sp.

auf, als sie Wesendoncks Versuche wiederholten, der (1880) alle nur denkbaren C-haltigen aber H-freien und H-haltigen Verbindungen in luftleere Geißler'sche Röhren brachte und dieselben durch allmäliges Erwärmen von außen in immer dichtere Dämpfe verwandelte, jedoch sowohl durch Funken- wie durch Büschellicht unter all diesen verschiedenen Umständen doch immer das Swan'sche Sp. erhielt. Die Banden dieses Sp. liegen in den 5 mittleren Farben, sind bald mehr, bald weniger breit, bald einerseits, bald beiderseits verwaschen, und wechseln an Zahl je nach Dichte und Temperatur. Auch die übrigen Metalloide, mit Ausnahme der Halogene, haben Bandenspectra; wenn man in einer Geißler'schen Röhre schwache Entladungen durch S-Dampf gehen läßt, entwickelt er ein besonders regelmäßiges cannelirtes Sp. Von den Metallen zeigt nur die Mg-Flamme einige Banden; als aber Lockyer und Roberts (1875) das el. Bogenlicht durch Metalldämpfe von höherer Temp. gehen ließen, zeigten diese meist ein cannelirtes Absorptionssp.; könnte man sie auf diese Temp. leuchtend erhalten, so würden sie dann auch das cannelirte Emissionssp. ergeben. Daß und warum die chemischen Verbindungen in Gas- oder Dampfform ein Bandensp. von geringer Regelmäßigkeit entwickeln, wurde schon erwähnt; ein brillantes Sp. von 7 Banden hat Kohlenoxyd, beschränkt und unregelmäßig sind die von Kohlensäure und Cyan; die meisten Bandenspectra der Verbindungen sind nur bei der Absorption zu beobachten, weil eben die Verbindungen bei der Hitze sich zersetzen, die zu ihrer Erleuchtung nöthig ist, und dann die Liniensp. der Elemente liefern.

Das Linienspectrum ist das charakteristische Spectrum der Elemente; da für die Verbindungen das Bandensp. ebenso charakteristisch ist, so hat der Gedanke der Einheit der Spectra immer noch eine gewisse Berechtigung, während die Mehrheit der Spectra durchaus nicht für alle Stoffe gilt. Uebrigens vermindert die Mehrheit der Sp. die Bedeutung der Spectralanalyse nicht; im Gegentheile, man erkennt aus der Art des Sp., das ein unzugänglicher Körper zeigt, seinen Zustand näher. Das Liniensp. entsteht durch die Schw. der Atome, also bei den stärksten Entladungen durch die verdünntesten Gase oder Dämpfe. Für H und O hat man sogar zwei Liniensp. gefunden, wodurch die Annahme nöthig wird, daß das Liniensp. auch durch die Schw. einfach gebauter Mol. entstehen kann. Das Fünfliniensp. des H entsteht bei höherer Temp. und geringer Dichte; es heißt deßhalb das elementare Liniensp. Bei sehr starker Verdünnung und niedrigerer Temp. entsteht das zusammengesetzte Liniensp., das zahlreiche Linien in allen niederen Farben bis ins Blau enthält. Beim O ist umgekehrt das elementare Liniensp. aus zahlreichen, das zusammengesetzte nur aus 4 Linien gebildet. Der N hat nur ein Liniensp., bei starken Entladungen durch das Gas oder die Luft entstehend; es hat zahlreiche Linien im Orange, Gelb und Grün, nur wenige im Roth, Blau, Indigo und Violett. Das Liniensp. des C entsteht, wenn starke Funken durch CO_2, CO und Kohlenwasserstoffe schlagen; es hat zahlreiche Linien im Grün und Blau, weniger in den anderen Farben. Der Schwefel ergibt ein Liniensp. auf mehrere Arten, das ungewöhnlich zahlreiche Linien in den höheren Farben zeigt; ähnlich verhalten sich Phosphor und Selen; Chlor, Brom und Jod zeigen Liniensp., wenn ihre Dämpfe von elektrischen Funken erleuchtet werden; die Linien sind weniger zahlreich, und Silicium und Bor haben sogar nur wenige Spectralstreifen. Auch die meisten Metalldämpfe haben zahlreiche Linien; jedoch treten die feinen und schwachen Linien nur auf, wenn die Elektroden aus dem betreffenden Metall hergestellt werden und starke Entladungen zwischen ihnen stattfinden, wenn also Druck und Temp. hoch sind Bei anderen Methoden zeigen sich nur die breiten und starken Hauptlinien, die nach Lockyer (320.) auch die langen Linien genannt werden; diese sind es denn auch, die für jedes Element charakteristisch sind und zur spectralanalytischen Erkennung vorzugsweise benutzt werden, wozu oft nur eine Linie schon ausreichend ist, wie z. B. die grüne Linie $H\beta$ des Wasserstoffs, die gelbe Doppellinie D des Natriums, die 3 nahe beisammen stehenden b-Linien des Magnesiums u. s. w.

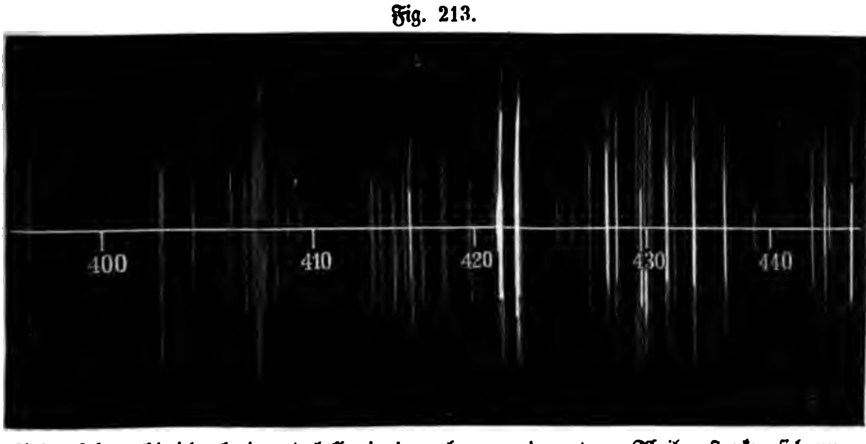
320 3. b. Einfluß von Temperatur und Druck auf die Spectra. Lockyers lange und kurze Linien (1873). Wenn ein Gas oder Dampf bei niedriger Temperatur und geringem Drucke leuchtet, so entsteht ein continuirliches Spectrum, jedoch nur an einem Ende; bei höherer Temperatur und geringem Drucke entsteht das Bandenspectrum, bei höchster Temperatur und geringem Drucke das Linienspectrum, dessen Linienzahl mit steigender Verdünnung immer kleiner wird. Wenn der Druck zunimmt, so verbreitern sich die Linien ein- oder zweiseitig, die Zahl der Linien vermehrt sich, so daß bei höchstem Druck und höchster Temperatur die Linienzahl und -Breite am größten wird, oder durch Zusammenfließen der zahlreichen verbreiterten Linien ein continuirliches Spectrum entsteht. Die Linien, welche schon bei geringem Drucke und hoher Temperatur vorhanden sind, treten auch bei stärkstem Drucke und höchster Temperatur auf

und sind unter gewissen Umständen lange Linien; die Linien, welche erst bei hohem Drucke und hoher Temperatur auftreten, sind unter jenen Umständen kurze Linien; hierdurch ist die Möglichkeit zweier Linienspectra desselben Elementes klar.

Die Erklärung dieser Gesetze geschieht durch die Verschiedenheit des Baues der Mol., ihre Zerlegung bei hoher Temp., ihre Verdichtung bei steigendem Drucke. Das H-Sp. zeigt bei geringstem Drucke und hoher Temp. nur die Linie Hβ, bei wachsendem Drucke tauchen die anderen 4 Linien zuerst sehr schwach auf und werden immer heller; bei wenigen mm Druck sind sie scharf und schmal; wird nun der Druck erhöht, so werden die Linienränder verschwommen, die Linien verbreitern sich und bilden nur noch Lichtmaxima auf dem immer heller werdenden Grunde, bis sie bei 10[at] auf dem glänzenden cont. Sp. verschwunden sind. Nach Schuster (1879) verläuft das O-Sp. beim allmäligen Auspumpen einer Geißler'schen Röhre folgendermaßen: Zuerst ist das Sp. vollkommen cont., dann entwickeln sich auf dessen Grunde die 4 Linien des zusammengesetzten Sp., während das cont. Sp. allmälig verschwindet und sich im Kathodenlicht das Bandensp. zeigt; bei höchster Verdünnung und Einschaltung einer Leydener Flasche und Luftstrecke entstehen die vielen Linien des elementaren Sp. Als (1880) Wesendonck die verschiedensten flüssigen Kohlenwasserstoffe in Geißler'schen Röhren verdampfte, gingen bei starker Verdichtung sowohl die Linien- als die Bandensp. immer in cont. Sp. über. Die meisten Metalldämpfe verbreitern bei der Verdichtung einseitig oder zweiseitig ihre Linien und entwickeln dann ein cont. Sp.

Am deutlichsten zeigt sich der Einfluß von Druck und Temp. in Lockyers langen und kurzen Linien. Derselbe richtete den Spalt seines Spectroskops nicht, wie es gewöhnlich geschieht, auf die Verbindungslinie der Kohlenspitzen des Bogenlichtes, sondern senkrecht zu dieser Linie, so daß die Mitte des Spaltes auf die heißesten und dichtesten Theile des Kohlenbogens gerichtet war, die oberen und unteren Enden des Spaltes aber auf weniger heiße und dichte Theile des Kohlenlichtes. Die Spectra dieser Theile liegen daher in der Fig. 213 auch oben und unten, das Sp. des heißesten und dichtesten mitteren Theiles aber in der Mitte der Fig., entlang der wagrechten Geraden. In diesem mittleren sind aber die

Fig. 213.



Linien sehr zahlreich, breit und hell, in den oberen und unteren Theil erstrecken sich nur wenige Linien, schmal und schwach, wodurch lange und kurze Linien zu unterscheiden sind. Die langen oder Hauptlinien treten unter allen Umständen auf, in der höchsten Temp. und Dichte, sowie in der niedrigsten Temp. und Dichte, bei der überhaupt die betreffenden Stoffe noch leuchten; die kurzen Linien treten aber nur bei der höchsten Temp. und Dichte auf; daher zeigen die Metalldämpfe immer zahlreichere Linien, je stärker die Entladungen und dadurch Temp. und Dichte werden; hierbei wachsen oft einige kurze Linien so an Helligkeit, daß sie die langen Linien überstrahlen und dadurch bei der gewöhnlichen Spaltstellung als Hauptlinien erscheinen. Gewöhnlich aber sind die langen Linien die Hauptlinien, in den Spectren der alkalischen und Erdmetalle treten sie breit und hell schon in der Bunsen'schen Gasflamme auf, während hier die kurzen ganz fehlen, wie auch bei schwachen Entladungen durch Geißler'sche Röhren nur wenige Hauptlinien erscheinen. Die langen Linien sind also die Hauptlinien der Spectralanalyse; sie treten auch allein auf, wenn ein Stoff in geringer Menge einem anderen zugemischt ist und das Sp. des Gemenges erzeugt wird; endlich wird

ihr Licht am stärksten absorbirt, weßhalb sie am leichtesten umkehrbar sind (324.). Lockyer hat in seinen „Studien zur Spectralanalyse" (1879) durch die langen und kurzen Linien die Hypothese zu begründen gesucht, daß in den Fixsternen unsere Elemente zersetzt vorkämen, hat jedoch die zahlreichen Einwände dagegen noch nicht widerlegt.

321 3. c. Harmonische und homologe Spectra. Wie ein Ton immer mit seinen harmonischen Obertönen verbunden ist, so könnten auch die Schwingungszahlen der höheren Liniengruppen einfache Multipla der Schwingungszahlen der niedrigsten Liniengruppe oder einer unsichtbaren ultrarothen Liniengruppe sein und dürften dann harmonische Oberlinien genannt werden; nur eine genaue Kenntniß der ultrarothen und ultravioletten Linien kann über diese streitige Frage entscheiden. Wie manche Chemiker heutzutage die Elemente nach den Atomgewichten in Gruppen ordnen, deren Glieder in ihren chemischen Verbindungen Aehnlichkeiten haben, so sollen auch die Spectren solcher Gruppenelemente Aehnlichkeiten darbieten und demnach homologe Spectra bilden.

Eine Analogie der Linien, die erst bei höherer Temp. und Dichte auftreten, mit harmonischen Obertönen ist offenbar vorhanden: die Linien sind nämlich schwächer und kürzer; Lithiumdampf zeigt in der Bunsenflamme nur die pfirsichblüthrothe Linie 670, in der Wasserstofffl. erscheint noch eine orangefarbige L. 610 und in der Knallgasfl. noch eine blaue L. 460. Wären die Wellenlängen dieser L. 690 = 6 . 115, 575 = 5 . 115 und 460 = 4 . 115, so wären sie die 4te, 5te und 6te harmonische Oberlinie der ultrarothen Grundlinie 115. Hiermit wird das harmonische Sp. wohl verständlich, aber leider sind die harmonischen Zahlen von den wirklichen zu weit entfernt, so daß für das Li eine harmonische Beziehung nicht existirt; man könnte freilich sagen, die richtigen Zahlen seien Vielfache von 10, also harmonische Obertöne des Grundtones 10; jedoch darf eine so tiefe Grundlinie nicht gewählt werden; man könnte sonst schließlich auch e i n s wählen, — und dann wäre alles harmonisch. An eine solche Wahl erinnert die Angabe Stoneys (1871), daß $H\alpha$, $H\beta$ und $H\delta$ bezüglich die 20., 27. und 32. Oberlinie des Grundtones 13 seien. Mehr versprechend erscheint eine andere gesetzmäßige Beziehung, auf welche Lecoq de Boisbaudran schon (1869) hinwies. Sowohl die Fraunhofer'sche D-Linie als die entsprechende Natriumlinie stellen sich in schärferen Apparaten als Doppellinien dar, ebenso ist die Liniengruppe b des Sonnensp. dreifach und ihr entspricht eine dreifache L. des Magnesiums. Als man nun bei höherer Temp. und Dichte die Sp. der beiden Metalldämpfe mit schärferen Apparaten untersuchte, stellten sich beim Na bis heute 11 Doppellinien vom Ultraroth bis tief ins Ultraviolett heraus; ebenso wiederholt sich der dreifache Streifen des Mg mehrfach bis in noch höhere Gegenden des Ultraviolett, und die drei sichtbaren Gruppen sind Obertöne von derselben Ordnung wie die obigen des H; nach Lecoq rücken die Linien der höheren Gruppen einander immer näher und ihre Wellenlängen behalten dasselbe Verhältniß zu einander. Auch in den Sp. der verschiedenen Elemente erkannte Lecoq schon 1869 die gesetzmäßige Beziehung, daß die Linien der Alkalimetalle mit steigendem Atomgewichte sich mehr dem rothen Ende nähern, als ob die schwereren Atome langsamere Schw. vollziehen müßten. Ciamician (1876—80) verglich die vollständigen Linienspectra homologer Elemente mit einander und fand, daß sie einander ähnlich sind, nur mehr oder weniger zusammengezogen auftreten und in verschiedenen Spectralgebieten liegen; so hat die Schwefelgruppe (S, O, Se, Te) homologe Spectren, ebenso die Halogene (Cl, Br, J, F), ferner die Metalle der alkalischen Erden (Ca, Sr, Ba, Mg), endlich die Stickstoffgruppe (N, P, As, Sb).

322 **Zerlegung des Lichtes durch Absorption** (Kirchhoff 1860, Lommel 1871—78). Wenn die Aetherwellen des Lichtes an einem neuen Medium anlangen, so kann es vorkommen, daß Schwingungen der Aetheratome auf Körpermoleküle übergehen, in ähnlicher Weise, wie die Schallschwingungen der Luft sich z. B. auf eine Saite übertragen und dieselbe zum Mittönen bewegen. Werden die Aetherschwingungen hierbei in Molekülschwingungen von geringer Zahl verwandelt, so daß an Stelle der verschwindenden leuchtenden Strahlen dunkle Körperwärme entsteht, so wird die Erscheinung Absorption im engeren Sinne genannt. Werden aber Körpermoleküle zu so hohen und starken Schwingungszahlen angeregt, daß der Körper selbstleuchtend wird, so heißt die Erscheinung, falls sie mit der Bestrahlung beginnt und endigt, also der Resonanz analog ist, Fluorescenz, falls sie dagegen erst allmälig durch Bestrahlung entsteht und erst nach derselben verlischt, also dem Mittönen analog ist, Phosphorescenz. Entsteht das Leuchten von Körpern

durch dunkle Wärmestrahlen, so heißt die Erscheinung Calcescenz. Diejenigen Strahlen, welche nicht absorbirt werden, gehen entweder durch den Körper oder werden reflectirt, und ertheilen hierdurch dem Körper seine Eigenfarbe; da dieselbe nur einen Theil des auftreffenden Lichtes enthält, so ist mit der Absorption eine Farbenzerlegung verbunden. Welche Strahlen oder Schwingungszahlen ein Körper absorbirt, das hängt von den Schwingungszahlen ab, die er selbst schon enthält; er absorbirt die Strahlen, welche dieselben Schwingungszahlen wie seine eigenen Moleküle, jedoch viel schwächer enthalten. Es ist dies ein specieller Fall eines allgemeinen von Kirchhoff aufgefundenen Absorptionsgesetzes; dasselbe hat indeß von Lommel die Erweiterung erfahren, daß ein Körper nicht blos seine eigenen Schwingungszahlen, sondern auch deren höhere und tiefere Octave absorbiren könne; die erstere Absorption nennt er die directe, die letztere die indirecte Absorption.

Wie nämlich tönende Schw. der Luft nur dann eine Saite zum Mittönen erregen, wenn dieselbe auf den betreffenden Ton gestimmt ist, so können auch Aetherschw. nur auf Mol. übergehen, wenn dieselben auf die betreffende Schwz. abgestimmt sind, oder besser gesagt, da die Mol. der Körper schon in Schw. begriffen sind, wenn sie die betreffende Schwz. mit sehr kleiner Amplitude enthalten. Denn in diesem Falle können die Aetherschw. die Molekülschw. verstärken und dadurch vorher unendlich kleine und deßhalb unwirksame Amplituden meßbar groß und daher wirksam machen; die geringe leb. Kft. eines Aetheratoms kann nämlich nur dann auf ein Mol. wirken, wenn es demselben nach jeder Schw. einen Stoß versetzen kann, wenn also seine Periode mit der des Mol. übereinstimmt. Ist aber z. B. die Schwingungsdauer des Atoms etwas kleiner als die des Mol., so kann wohl in einem gewissen Moment der Zusammenstoß auf das eben ruhende Molekül stattfinden, nach einer Aetherschw. aber wird dasselbe etwas vor dem Ende seiner Schw., also in der Rückkehr gestoßen, und in vielen folgenden Perioden ebenfalls, seine Bewegung wird also vermindert oder gar aufgehoben. Stimmen dagegen die Perioden überein, so wird das Mol. immer z. B. in seiner Ruhelage getroffen, erhält bei jeder Schw. einen Zuwachs seiner leb. Kft. und dadurch eine Verstärkung seiner Bewegung. Dieser specielle Fall des noch zu betrachtenden Kirchhoff'schen Gesetzes wurde von Lommel erweitert; derselbe machte nämlich darauf aufmerksam, daß ein Aetheratom auch jede Molekülschw. treffe, wenn seine Periode halb so groß als die des Moleküls sei; allerdings geht dann die Hälfte der Aetherstöße verloren; denn trifft ein Aetheratom das Mol. jetzt in seiner diesseitigen Ruhelage, so ist dasselbe nach einer Aetherperiode in der jenseitigen, kann also nicht von dem Atom getroffen werden; dagegen erhält das Mol. wieder einen Stoß, wenn es in seine diesseitige Lage zurückgekehrt ist, weil dann auch wieder eine Aetherperiode zu Ende ist; es findet also auch hier eine Verstärkung statt. Ebenso in dem Falle, wenn die Aetherperiode doppelt so groß als die des Mol. ist; dann wird das Mol. nur nach je zwei Schw. getroffen, aber doch regelmäßig nach je zwei Schw., erfährt also ebenfalls eine Verstärkung. In den letzten Fällen, die Lommel indirecte Absorption nennt, in welchen also eine Schwz. eines Körpers die halb oder doppelt so große Schwz. von Lichtstr., die höhere oder tiefere Octave, absorbirt, ist die Verstärkung nicht so groß wie bei der directen Absorption.

Welche Schwzn. ein Körper enthält, welche Farben er daher absorbiren kann, hängt von seiner materiellen Beschaffenheit und von seiner Temp. ab; schon öfter wurde erklärt, daß bei höherer Temp. die Anzahl der verschiedenen Schwzn. steige, weil bei vergrößerten Amplituden die Mol. öfter zusammenstoßen. Aber auch bei niederer Temp. enthält ein Körper nicht eine Schwz., sondern viele verschiedene, weil seine Mol. mit verschiedener Kraft in ihrer Lage verharren, und diese Schwzn. stehen jedenfalls in innigem Zusammenhange, weil die Mol. durch ihre Anziehung ein zusammenhängendes Ganzes bilden. Wenn eine Schwz. verstärkt wird, eine vergrößerte Amplitude erhält, so muß diese Verstärkung sich auch auf die übrigen übertragen, weil die Mol. der ersten Zahl durch ihre vergrößerten Amplituden auf die übrigen stoßen. So wie also in einem musikalischen Instrumente die Grund- und Obertöne gleichzeitig erregt werden, so werden die Schwzn. eines Körpers gleichzeitig verstärkt.

323 **Die Absorption des Lichtes** im engeren Sinne ist die Aufhebung einzelner Farbenstrahlen beim Eindringen von Licht in das Innere eines Körpers. Mittels des Spectroskops kann man leicht erfahren, welche Strahlen absorbirt wurden; man richtet dasselbe so, daß es das übrig gebliebene Licht aufnimmt; dieses wird dann in seine Farben zerlegt und bildet ein Absorptionsspectrum, in welchem an Stelle der absorbirten Farben dunkle Stellen erscheinen.

Die Emissionsspectralanalyse untersucht das Licht, das von leuchtenden Körpern ausgestrahlt wird, die Absorptionsspectralanalyse will dagegen erforschen, welche Veränderungen das Licht erfährt, wenn es durch Körper hindurchgegangen ist; sie muß daher voraussetzen, daß eine Lichtquelle vorhanden ist, welche allfarbiges Licht, also an sich ein cont. Sp. liefert, wie etwa Lampenlicht oder für schwächere Apparate auch Tageslicht. Solches Licht läßt man durch den zu prüfenden Stoff gehen und untersucht es dann mit dem Spectralapparat. Setzt man z. B. vor den Spalt eines solchen Apparates ein dünnes blaues Kobaltglas und sieht sodann nach einer hellen Lichtflamme, so ist das Sp. nicht mehr continuirlich; im Roth und Orange sind breite dunkle verwaschene Streifen, Gelb ist ungeschwächt, Grün durch ein dunkles Feld ersetzt, während der blaue Theil des Sp. unverändert erscheint. Das Kobaltglas absorbirt demnach Roth, Orange und Grün, läßt jedoch Gelb, Blau und Violett durch. Hält man vor die Spaltöffnung des Steeg'schen Spectroskops einen Didymglaswürfel, so sieht man zwei dunkle Streifen, entsprechend den 2 hellen Linien, die das glühende Didym zeigt; auch die von Steeg bezogenen Platten von Uranit, Parisit, Zirkon, Granat u. a. lassen die Absorption durch feste Körper in gleicher Weise erkennen. — Um die Absorptionsspectra flüssiger Körper zu beobachten, füllt man diese in dünne Gefäße, aus planparallelen Glastäfelchen gebildet, stellt das Gefäß vor den Spalt und sieht nach dem Himmel oder einer Flamme. Man hat auch eigene Absorptionsfläschchen von rechteckigem Querschnitte, 1cm dick und 4cm breit, so daß man die Wirkung dünner und dicker Schichten beobachten kann. Will man den Einfluß sehr dicker Schichten prüfen, so füllt man die Flüssigkeit in ein vertical aufgestelltes Probirgläschen, das zur Abhaltung des Nebenlichtes von schwarzem Papier umschlossen ist und das durch einen unten liegenden Spiegel reflectirtes Himmels- oder Lampenlicht erhält, während man von oben durch ein ebenfalls vertical aufgestelltes Spectroskop in das Gläschen sieht. Stellt man z. B. vor den Spalt ein Gläschen, das mit einer ätherischen Lösung von Blattgrün (Chlorophyll) erfüllt ist, so sieht man 5 verwaschene Banden im Roth, Orange und Gelb, während Grün ungeschwächt bleibt und der blaue Theil des Spectrums ganz verlöscht ist; das Chlorophyll absorbirt also alles Blau und Violett, einzelne Strahlenarten von Roth, Orange und Gelb, läßt jedoch Grün ungeschwächt durchgehen. Steeg liefert obige Fläschchen gefüllt mit Flüssigkeiten, die charakteristische Absorptionsstreifen ergeben. — Die Absorptionsspectra der Gase und Dämpfe kann man am besten mittels matter Lampenglaskugeln untersuchen, deren beide Oeffnungen durch Spiegelglastafeln verschlossen werden, während durch eine seitliche Oeffnung das Gas eingeleitet wird; man sieht mittels des Spectroskops durch die beiden Oeffnungen nach einem fernen Lichte; oder man schaltet einfach zwischen das Spectroskop und eine Flamme ein dampferfülltes Glasgefäß ein. Richtet man z. B. den Apparat auf eine mit dem violetten Joddampf erfüllte Flasche, so sieht man zahlreiche sehr schmale Banden eng neben einander im Orange, Gelb und Grün, während Roth, Blau und Violett fast unverändert bleiben. Auch Stickstoffdioxyd läßt Roth durch, enthält auch zahlreiche, aber mehr auseinander gestellte Banden in den folgenden Farben, während Blau und Violett fast ausgelöscht sind.

Wie die Emissionssp., so ändern sich auch die Absorptionssp. unter verschiedenen Umständen. Die Metalldämpfe haben bei niedrigster Temp. cont. Absorption, bei höherer Temp. cannelirte Absorptionsbanden, bei höchster Temp. Absorptionslinien, deren Zahl sich mit steigendem Drucke vergrößert, ganz wie bei der Emission. Die durchscheinenden festen und flüssigen Körper haben, entsprechend der niedrigen gewöhnlichen Temp., in welcher sie der Absorption ausgesetzt werden, ein unregelmäßiges Bandensp. Hierbei ist die Abs. der Flüssigkeiten von der C o n c e n t r a t i o n d e r L ö s u n g und der D i c k e d e r S c h i c h t abhängig. Eine dünne Schicht sehr verdünnter Fuchsinlösung erzeugt einen schwarzen, verwaschenen Streifen im Gelbgrün; verstärkt man die Lösung, so wird der schwarze Streifen dunkler, verbreitert sich nach dem Blau hin und löscht schließlich Blau und Violett ganz aus, so daß nichts weiter hindurch geht als Orange und Roth. Füllt man Fuchsinlösung, die in dünner Schicht nur einen schmalen Absorptionsstreifen gibt, in ein Probirgläschen und sieht der Länge nach hindurch, so erscheint der Absorptionsstreifen breiter und dunkler. Wenn hiernach die Absorptionssp. der durchscheinenden festen und flüssigen Körper auch durchgängig nicht scharf sind, so sind doch die meisten so charakteristisch, daß man jedem Körper auch ein bestimmtes Absorptionssp. zugestehen muß und ihn daher vermittelst desselben erkennen kann. Man theilt deßhalb die Absorptionsspectra und danach die Absorption selbst in mehrere Abtheilungen. Fängt das Sp. an irgend einer Stelle an, dunkel zu werden, und nimmt nach dem einen Ende, gewöhnlich nach dem violetten Ende hin, fortwährend an Dunkelheit zu, so sagt man, der Körper habe e i n s e i t i g e A b s o r p t i o n, wie z. B. Eisenchlorid. Steigt aber die Dunkelheit nach beiden Seiten hin, wie z. B. beim Kupferchlorid, so schreibt man dem Körper z w e i s e i t i g e A b s o r p t i o n zu. Steigt die Dunkelheit allmälig bis zu einer gewissen Stelle des Sp. und nimmt dann allmälig wieder ab, enthält also das Sp. eine sehr breite, nach beiden Seiten verwaschene Bande, so nennt man dieselbe S c h a t t e n. Erscheint im Sp. plötzlich eine dunkle Stelle, die ebenso rasch auf der anderen Seite abnimmt,

durch dunkle Wärmestrahlen, so heißt die Erscheinung **Calcescenz**. Diejenigen Strahlen, welche nicht absorbirt werden, gehen entweder durch den Körper oder werden reflectirt, und ertheilen hierdurch dem Körper seine Eigenfarbe; da dieselbe nur einen Theil des auftreffenden Lichtes enthält, so ist mit der Absorption eine Farbenzerlegung verbunden. Welche Strahlen oder Schwingungszahlen ein Körper absorbirt, das hängt von den Schwingungszahlen ab, die er selbst schon enthält; er absorbirt die Strahlen, welche dieselben Schwingungszahlen wie seine eigenen Moleküle, jedoch viel schwächer enthalten. Es ist dies ein specieller Fall eines allgemeinen von Kirchhoff aufgefundenen Absorptionsgesetzes; dasselbe hat indeß von Lommel die Erweiterung erfahren, daß ein Körper nicht blos seine eigenen Schwingungszahlen, sondern auch deren höhere und tiefere Octave absorbiren könne; die erstere Absorption nennt er die directe, die letztere die indirecte Absorption.

Wie nämlich tönende Schw. der Luft nur dann eine Saite zum Mittönen erregen, wenn dieselbe auf den betreffenden Ton gestimmt ist, so können auch Aetherschw. nur auf Mol. übergehen, wenn dieselben auf die betreffende Schwz. abgestimmt sind, oder besser gesagt, da die Mol. der Körper schon in Schw. begriffen sind, wenn sie die betreffende Schwz. mit sehr kleiner Amplitude enthalten. Denn in diesem Falle können die Aetherschw. die Molekülschw. verstärken und dadurch vorher unendlich kleine und deßhalb unwirksame Amplituden meßbar groß und daher wirksam machen; die geringe leb. Kft. eines Aetheratoms kann nämlich nur dann auf ein Mol. wirken, wenn es demselben nach jeder Schw. einen Stoß versetzen kann, wenn also seine Periode mit der des Mol. übereinstimmt. Ist aber z. B. die Schwingungsdauer des Atoms etwas kleiner als die des Mol., so kann wohl in einem gewissen Moment der Zusammenstoß auf das eben ruhende Molekül stattfinden, nach einer Aetherschw. aber wird dasselbe etwas vor dem Ende seiner Schw., also in der Rückkehr gestoßen, und in vielen folgenden Perioden ebenfalls, seine Bewegung wird also vermindert oder gar aufgehoben. Stimmen dagegen die Perioden überein, so wird das Mol. immer z. B. in seiner Ruhelage getroffen, erhält bei jeder Schw. einen Zuwachs seiner leb. Kft. und dadurch eine Verstärkung seiner Bewegung. Dieser specielle Fall des noch zu betrachtenden Kirchhoff'schen Gesetzes wurde von Lommel erweitert; derselbe machte nämlich darauf aufmerksam, daß ein Aetheratom auch jede Molekülschw. treffe, wenn seine Periode halb so groß als die des Moleküls sei; allerdings geht dann die Hälfte der Aetherstöße verloren; denn trifft ein Aetheratom das Mol. jetzt in seiner diesseitigen Ruhelage, so ist dasselbe nach einer Aetherperiode in der jenseitigen, kann also nicht von dem Atom getroffen werden; dagegen erhält das Mol. wieder einen Stoß, wenn es in seine diesseitige Lage zurückgekehrt ist, weil dann auch wieder eine Aetherperiode zu Ende ist; es findet also auch hier eine Verstärkung statt. Ebenso in dem Falle, wenn die Aetherperiode doppelt so groß als die des Mol. ist; dann wird das Mol. nur nach je zwei Schw. getroffen, aber doch regelmäßig nach je zwei Schw., erfährt also ebenfalls eine Verstärkung. In den letzten Fällen, die Lommel indirecte Absorption nennt, in welchen also eine Schwz. eines Körpers die halb oder doppelt so große Schwz. von Lichtstr., die höhere oder tiefere Octave, absorbirt, ist die Verstärkung nicht so groß wie bei der directen Absorption.

Welche Schwzn. ein Körper enthält, welche Farben er daher absorbiren kann, hängt von seiner materiellen Beschaffenheit und von seiner Temp. ab; schon öfter wurde erklärt, daß bei höherer Temp. die Anzahl der verschiedenen Schwzn. steige, weil bei vergrößerten Amplituden die Mol. öfter zusammenstoßen. Aber auch bei niederer Temp. enthält ein Körper nicht eine Schwz., sondern viele verschiedene, weil seine Mol. mit verschiedener Kraft in ihrer Lage verharren, und diese Schwzn. stehen jedenfalls in innigem Zusammenhange, weil die Mol. durch ihre Anziehung ein zusammenhängendes Ganzes bilden. Wenn eine Schwz. verstärkt wird, eine vergrößerte Amplitude erhält, so muß diese Verstärkung sich auch auf die übrigen übertragen, weil die Mol. der ersten Zahl durch ihre vergrößerten Amplituden auf die übrigen stoßen. So wie also in einem musikalischen Instrumente die Grund- und Obertöne gleichzeitig erregt werden, so werden die Schwzn. eines Körpers gleichzeitig verstärkt.

323 **Die Absorption des Lichtes** im engeren Sinne ist die Aufhebung einzelner Farbenstrahlen beim Eindringen von Licht in das Innere eines Körpers. Mittels des Spectroskops kann man leicht erfahren, welche Strahlen absorbirt wurden; man richtet dasselbe so, daß es das übrig gebliebene Licht aufnimmt; dieses wird dann in seine Farben zerlegt und bildet ein **Absorptionsspectrum**, in welchem an Stelle der absorbirten Farben dunkle Stellen erscheinen.

derselben Gattung. Ueber diese beiden Vermögen besteht nach Kirchhoff folgendes Gesetz: **Das Verhältniß zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen ist für Strahlen von derselben Wellenlänge und derselben Temperatur bei allen Körpern dasselbe.**

Kirchhoffs strenger Beweis ist an dieser Stelle unmöglich; wir müssen uns mit einer Erklärung begnügen. Die Emission besteht darin, daß ein Körper die in ihm enthaltenen Schw. dem benachbarten Aether mittheilt; die Absorption darin, daß der Körper Schw. von dem benachbarten Aether empfängt. Nun sind aber die meisten Körper auf bestimmte Schwzn. abgestimmt, d. h. ihre Mol. vermögen bei einer gewissen Temp. nur eine gewisse kleinere oder größere Anzahl von Schwzn. auszuführen. Andere als die in ihm enthaltenen Schwzn. aber kann ein Körper dem benachbarten Aether nicht mittheilen, er kann nur seine Schwzn. emittiren. Dasselbe gilt auch von der Absorption; wie ein mittönender Körper aus einem Tongemische nur diejenigen Schallschw. aufnimmt, auf welche er abgestimmt ist, so kann auch jeder Körper aus den Aetherwellen seiner Umgebung nur diejenigen Schw. aufnehmen, auf welche seine Mol. bei der stattfindenden Temp. abgestimmt sind.

Das Kirchhoff'sche Gesetz erklärt das **Absorptionslinienspectrum** der glühenden Dämpfe und Gase und die **Fraunhofer'schen Linien.** Ein Absorptionslinienspectrum entsteht, wenn das allfarbige Licht eines in hoher Weißgluth befindlichen Körpers durch glühende Dämpfe oder Gase geht; und zwar stehen **die dunkeln Absorptionslinien an denselben Stellen des Spectrums, an welchen das Spectrum des für sich allein leuchtenden Dampfes oder Gases hellfarbige Linien enthält.** Dieses Auftreten dunkler Linien an der Stelle von hellfarbigen nennt man die **Umkehrung der Linien**, resp. des Spectrums. Die Fraunhofer'schen Linien des Sonnenspectrums entstehen hiernach dadurch, daß das allfarbige Sonnenlicht durch eine die Sonne umgebende leuchtende Dampf= oder Gashülle geht. Aus den Fraunhofer'schen Linien kann man die Bestandtheile dieser Gashülle erkennen; es sind diejenigen Dämpfe oder Gase, welche für sich allein leuchtend an den Stellen der Fraunhofer'schen dunkeln Linien hellfarbige Linien erzeugen.

Natriumdampf strahlt für sich allein leuchtend nur eine Schwz. von 520 Bill. aus; daraus folgt, daß seine Mol. nur auf diese eine Schwz. abgestimmt sind, daß sie nur diese eine Art von Schw. ausführen können. Wenn daher allfarbiges Licht von größerer Intensität durch Natriumdampf geht, so kann derselbe aus jener Lichtmischung nur diese eine Art von Schw. aufnehmen, und er muß dieselbe aufnehmen, weil seine Mol. von den heftiger bewegten Aetheratomen getroffen werden. Wenn hiernach das allfarbige Licht aus dem Natriumdampfe heraustritt, so muß diese eine und zwar nur diese eine Schwz. an Intensität geschwächt sein, es muß daher in dem sonst cont. Sp. des allfarbigen Lichtes die Stelle dunkler sein, an welcher sich das Gelb jener Schwz. befindet, d. h. es muß an der Stelle des Sp. eine dunkle Linie stehen, an welcher im Sp. des glühenden Natriumdampfes die gelbe Linie steht. — Die Umkehrung der Linien läßt sich auf verschiedene Art ausführen. Am einfachsten, indem man in der hinteren Seite der heißen Bunsen'schen Gasflamme einen Platindraht zur Weißgluth bringt, in die vordere Seite weiter unten eine Natriumsalzperle hält und mit einem Taschenspectroskop nach dem Platindrahte sieht: man erblickt dann in dem cont. Sp. des Platindrahtes eine dunkle Linie an der Stelle des gelben Natriumstreifens, an der Stelle der Fraunhofer'schen Linie D. — Macht man in den unteren Kohlenstift der elektrischen Lampe eine Grube und legt in dieselbe ein Stückchen Natrium, so ist bei dem Durchgehen des elektrischen Stromes das elektrische Kohlenlicht bald von einer Natriumdampfwolke umhüllt, und man erblickt auch hier in dem Sp. des elektrischen Lichtes die dunkle Linie D. — Man kann auch vor das elektrische Licht eine Röhre stellen, die mit heißem Natriumdampfe gefüllt ist, und mit dem Spectroskop durch die Röhre nach dem Lichte sehen, um diese dunkle Linie zu erblicken. Auch objectiv auf einem Schirme kann man das Sp. mit der dunkeln D=Linie herstellen: Vor dem elektrischen Lichte brennt eine Bunsen'sche Gasflamme mit einer Natriumsalzperle, vor dieser steht eine Linse, dann folgt das Prisma und endlich der Schirm, auf dem sich das Spectrum mit der dunkeln D=Linie entwickelt.

Mit solchen Methoden hat Kirchhoff sein Gesetz entdeckt und die Umkehrung der Hauptlinien von Na, Li, K, Sr, Ba und Ca durchgeführt. Bei der zweiten Methode erscheinen zuerst die hellen Linien des Metalls, wenn die Elektroden etwas weit voneinander entfernt sind, weil dann die in voller Gluth befindlichen Metalldämpfe stärker als das Bogenlicht leuchten; nähert man die Elektroden mehr, so wird das Bogenlicht stärker, während das Licht

der Metalldämpfe durch allmäliges Verbranntsein derselben schwächer geworden ist. Hier ist der Uebergang der hellen Linie in die dunkle an derselben Stelle, die Umkehrung im wahren Sinne des Wortes direct zu sehen. Nach dieser Methode hat Cornu (1871) die Hauptlinien von Na, Th, Pb, Ag, Mg, Al, Cd, Zn und Cu umgekehrt; für andere Metalle gelang es nicht, und von der angeführten Metallreihe für die ersten am leichtesten, für die letzten am schwierigsten. Auch wies er schon darauf hin, daß nicht alle Hauptlinien eines Metalls sich mit gleicher Leichtigkeit umkehren lassen, und daß die weniger brechbaren Linien leichter umkehrbar seien. Lockyer nahm daher 1874 die Umkehrungsversuche mit einem Ofen vor, in welchem die Metalle in einer Eisenröhre durch ein Coaksfeuer oder in einem Kalkgefäß durch die Knallgasflamme geschmolzen und verdampft wurden; auf der einen Seite der mit Glasplatten verschlossenen Röhre stand eine elektrische Lampe, auf der anderen das Spectroskop. Es ergab sich, vollkommen dem Kirchhoff'schen Gesetze entsprechend, daß jeder Metalldampf bei niedrigster Temp. cont. Absorption am blauen oder rothen Ende hat, bei höherer cannelirte Absorptionsstreifen, bei höchster Absorptionslinien, deren Zahl bei steigender Temp. und Dichte sich vermehrt; die zuerst umgekehrten Linien waren die langen Linien, später wurden auch kurze umgekehrt; die langen Linien sind also die leicht umkehrbaren Linien. Die vollkommenste Bestätigung erhielt aber das Kirchhoff'sche Gesetz durch die seit 1879 von Liveing und Dewar fortgesetzten großartigen Versuche mit ihren Apparaten, von denen 2 in Fig. 212 (S. 370) abgebildet sind, und in denen die Metalle durch das el. Kohlenlicht verdampft werden und das Licht mit ihrem Dampfe einhüllen; auch die schwerst schmelzbaren Metalle zeigten im Absorptionssp. dieselben dunkeln Haupt- und Nebenlinien, welche sie im Emissionssp. farbig leuchtend entwickeln.

Wenn sonach die dunkeln Absorptionslinien durch glühende Dämpfe oder Gase entstehen, durch welche das Licht einer intensiveren allfarbigen Lichtquelle geht, und wenn das Sp. der Sonne mit seinen Fraunhofer'schen Linien ein derartiges Absorptionssp. ist, so muß man schließen, daß die Sonne und die Fixsterne weißglühende von einer Dampfhülle umgebene Körper sind, wodurch sich die Fraunhofer'schen Linien erklären. Und wenn weiter die dunkeln Linien an denselben Stellen des Sp. stehen, an welchen die absorbirenden oder linienerzeugenden Dämpfe helle Linien erzeugen, wenn sie für sich allein glühen, so kann man offenbar aus der Lage der dunkeln Linien eines Absorptionssp. die Dämpfe erkennen, welche als Dampfhülle diese Linien erzeugen. Findet man z. B. in einem Absorptionssp. an der bekannten Stelle der Natriumlinie einen dunkeln Streifen, wie die dunkle Linie D im Sonnensp., so ist dies ein Zeichen, daß das Licht durch eine Natriumdampfschicht gegangen ist. In solcher Weise hat man aus den Fraunhofer'schen Linien des Sonnensp. und ihrer Stellung in den verschiedenen Farben gefunden, aus welchen Stoffen die Sonne besteht und in welchem Zustande diese Stoffe sich befinden.

Da das Sonnensp. mit seinen Fraunhofer'schen Linien die Grundlage der ganzen Spectralanalyse ist, da diese Linien uns das Wesen und die Stoffe der Sonne (und der Fixsterne) kundgeben und nach Lockyer sogar die Dissociation der Elemente erkennen lassen, so ist die genaueste Kenntniß derselben, sowohl im leuchtenden Theil, als auch im Ultraroth und Ultraviolett von der höchsten Bedeutung. Nach Kirchhoffs und Hoffmanns Zeichnung und Messung der Fraunhofer'schen Linien, wodurch die Zahl derselben auf mehr als 1600 stieg, folgten Angström und Thalen, welche die Zahl der mit ihrer Wellenlänge gemessenen Sonnenlinien auf 2000 brachten. Dann folgte H. Draper (1873) mit einer ausgedehnten Photographie des violetten und ultravioletten Theiles; hiernach besteht die Fraunhofer'sche Linie H aus 50 feinen dunkeln Linien, L im Ultraviolett aus 25, und zwischen H und L hat die Photographie 138 Linien; die Wellenlänge von L gibt er = 382 $\mu\mu$, die von M 374, von N 358, von O 344. Soret sah (1874) mit seinem fluorescirenden Ocular noch die Stokes'schen Linien bis S; ein ausgezeichneter Atlas von Cornu (1880) geht von h = 410 bis U = 294; er enthält die Zahlen von Draper, aber außerdem noch H = 396, K = 393, P = 336, Q = 327, R = 318, r = 314, S_1 = 310, S_2 = 309,9, s = 304, T = 302, t = 299, U = 294. Wie im Ultraroth untersucht wurde, ist schon in 318. angegeben worden; J. W. Draper fand nur drei breite Streifen im Ultraroth nahe bei A, Abney (1880) gab 4 Linien an um 820 und eine bei 824, zusammen mit Z bezeichnet, zwei starke Linien X bei 854 und 866, eine Linie π = 900 u. s. w., bis schließlich zwei Banden ψ_1 und ψ_2, deren Mitte bei 2700 liegt. H. Becquerel fand nach der Phosphorescenzmethode zunächst die schon von Brewster und Gladstone beobachteten 5 Banden bei 763, 787, 800, 812 und 824; dann 4 breite Banden bei 930, 1082, 1230 und 1477, welche letztere mit Fizeaus kalter Linie (1847) stimmt; (1884) gibt er zwischen 760 und 1880 $\mu\mu$ 27 Linien und Gruppen, deren letzte mit Langleys äußerster Bolometerbande zusammenfällt. Im Ganzen sind im Sonnensp. wohl schon über 10000 Linien beobachtet worden.

Lockyer stellte in seinen „Studien zur Spectralanalyse“ 1879 zusammen, welche von diesen Linien Umkehrungen der Spectrallinien irdischer Dämpfe und Gase sind und wieviele derselben jedem Element zukommen, woraus sich ergibt, welche Elemente in der umkehrenden

Sonnenhülle enthalten sind. Da die Anzahl derselben nicht gering ist, so müssen wir die umkehrende Schicht der Sonnenatmosphäre als ein Gas- und Dampfgemenge ansehen. Nun treten aber bei einem solchen Gemenge von dem geringsten Gemengtheile nur die längsten Linien auf, von dem stärksten Gemengtheile aber auch kurze Linien; wenn daher von einem Element alle oder viele Linien auftreten, so ist es in dem Gemenge in großem Betrage vorhanden; treten nur wenige, nämlich die längsten Linien auf, so ist das Element in geringem Betrage vorhanden. Die Wasserstofflinien sind sämmtlich in dem Sonnensp. umgekehrt vorhanden und zwar die Hauptlinien sehr breit und stark dunkel; von den Eisenlinien sind 450 in dem Sonnensp. umgekehrt; demnach besteht die umkehrende Hülle der Sonne hauptsächlich aus Wasserstoff und Eisendampf. Vom Na sind die D-Linien besonders stark umgekehrt, von Ca 4, von Cr 18, von Ni 39, von Ba 11, von Zn 2, von Co 19, von Mn 57, von Ti 118, von Al 2, von Sr 4, von Pb 3, von Cd 2, von Ce 2, von U 3, von K 3, von V 4, von Pd 5 und von Mo 4 Linien als umgekehrt vorhanden constatirt; folglich sind diese Elemente in geringerer Menge, aber sicher in der umkehrenden Schicht der Sonnenatmosphäre vorhanden. Auch der Atlas von Cornu und die Tabellen von Liveing und Dewar (1883) führen hauptsächlich Linien der genannten Stoffe als im ultravioletten Sonnensp. umgekehrt an, ebenso fallen die Phosphorescenzlinien H. Becquerels (1883) im Ultraroth vorwiegend mit ultrarothen Sonnenlinien jener Elemente zusammen, so daß man jetzt mit einiger Sicherheit behaupten kann, daß die umkehrende Sonnenhülle hauptsächlich aus den genannten Elementen besteht. Jedoch können in dieser Hülle auch unbekannte Elemente enthalten sein, da gar manche Fraunhofer'sche Linien, z. B. selbst die starken A und B, noch nicht als Umkehrungen irdischer Spectrallinien erkannt sind; auch zeigt eine andere Sonnenhülle, die Chromosphäre (564.) eine helle Linie, nahe bei D, welche von den irdischen Elementen nicht bekannt ist, so daß man sie einem eigenen Sonnenstoff zuschreibt, den man deßhalb Helium nennt; sie kommt auch in den Protuberanzen vor und ist im Sp. der Sonnenflecken stark umgekehrt, während ihre Umkehrung unter den Fraunhofer'schen Linien vergeblich gesucht wird; nach Allem darf man wohl sagen, daß die Sonne hauptsächlich aus irdischen Elementen besteht. Da keine Banden in dem Sonnensp. auftreten, so enthält sie keine chemischen Verbindungen, und da außerdem die Linien selbst bei der großen Dicke der Sonnenhülle scharf sind, so muß eine ungemeine hohe Temp. in der Sonne vorausgesetzt werden.

Nur bei tiefem Stande der Sonne, wo der von den Str. durch die Atmosphäre zurückgelegte Weg 15mal so groß ist als der von Zenithstrahlen, ziehen sich durch das ganze farbige Sp. verwaschene Banden, die auch die Linien A und B verbreitern und verdunkeln und sie noch bandenähnlicher machen als sie sind; bei hohem Sonnenstande verschwinden jene Banden beinahe oder ganz; sie können demnach nur durch Absorption seitens der Erdatmosphäre entstanden sein und heißen daher auch atmosphärische oder terrestrische Linien. Brewster beobachtete sie zuerst 1833 und gab 1861 mit Gladstone Zeichnungen derselben; er fand auch schon 5 solcher Banden nahe bei A im Ultraroth, deren Wellenlängen Becquerel (1883) nach seiner Phosphorographie von 762 bis 830 angibt; auch die 4 ultrarothen Linien von 930 bis 1470 sind eigentlich Banden, und in Abneys Atlas des Ultraroth machen alle Linien den Eindruck von Banden. Mehrere von diesen Banden fallen nun nach Becquerel (1883—4) mit ultrarothen Linien des Na, Ca und Mg zusammen, wodurch es unwahrscheinlich wird, daß dieselben terrestrisch sind. Janssen hatte nämlich durch Beobachtung des Sp. eines entfernten Feuers über den Genfer See hin (1864), des Sp. einer Gasflamme durch ein 37m langes wasserdampferfülltes Rohr (1866) und das Sp. eines aufgehenden Sternes (1868) gefunden, daß mehrere der verwaschenen Banden im leuchtenden Sonnenspectrum vom Wasserdampf der Atmosphäre herrühren, während Chappuis (1880) nach dem Auffinden des Ozonsp. solche diesem Stoffe, dann Egoroff (1882) andere Linien der Luft zuschreibt und Becquerel ultrarothe Banden durch Sonnenstoffe erklärt; demnach sind über diesen Gegenstand entscheidende Forschungen wohl bald zu erwarten.

Piazzi Smyth (1874) beobachtete zuerst, daß vor starkem Regenwetter zwischen den Fraunhofer'schen Linien D und C ganz nahe bei D ein intensiver dunkler Streifen erschien, der bei trockener Luft nicht sichtbar ist und mit der Feuchtigkeit der Luft dunkler wird. Später haben Schellen und Klein noch mehrere solcher Regenbanden aufgefunden und Rand Capron hat (1881) angegeben, wie sie zur Wetterprognose benutzt werden können. Während die Hygrometer und Psychrometer nur die Feuchtigkeit der Umgebung anzeigen, erhält man durch die Wasserdampflinien, vorausgesetzt, daß sie sicher erkannt und einfach zu beobachten sind, ein Urtheil über die Feuchtigkeit der ganzen Atmosphäre.

325 **Anwendung der Spectral-Analyse.** 1. Zum raschen Erkennen des Vorhandenseins von Elementen, besonders von Metallen in größeren und geringsten Mengen. Diese Anwendung beruht auf der unerhörten Empfindlichkeit der Emissionsspectralanalyse; $^1/_{3\,000\,000}$ mg eines Natriumsalzes genügt, um die gelbe Linie zu erzeugen. Bei anderen Elementen ist die Empfindlichkeit allerdings geringer, aber immer

noch sehr groß; so sind $^{9}/_{1\,000\,000}{}^{mg}$ eines Lithiumsalzes, $^{1}/_{1\,000}{}^{mg}$ eines Kaliumsalzes, $^{6}/_{1000}{}^{mg}$ eines Strontiumsalzes ausreichend, die Linien der Metalle zu erzeugen. Das Natriumsp. ist in jedem anderen Sp. vorhanden, woraus man schließen muß, daß die Luft immer und überall Natrium, wohl als Kochsalz enthält, vielleicht in Gestalt von Sonnenstäubchen, durch das Zerstäuben des Meerwassers hervorgebracht; kein anderes chemisches Mittel gibt von diesem Kochsalzgehalt Kunde. Bringt man das Aschenende einer Cigarre in die Bunsen'sche Flamme, so sieht man mit dem Spectroskop gewöhnlich die Linien von Na, K und Li. In vielen Fällen kann man auf dieselbe Weise, in anderen nach einfacher Vorbereitung erkennen, ob in irgend einem Mineral, einer Bodenart, einer Lösung irgend ein Metall enthalten ist; ja auch P läßt sich auf ähnliche Art nachweisen. So wurde gefunden, daß manche Elemente wie z. B. Li viel weiter verbreitet sind, als man vorher wußte; Bence Jones beobachtete bei einem Staarblinden, daß mit der Nahrung eingenommenes Li schon in $3^{1}/_{2}$ Stunden bis in die Krystalllinse gedrungen war.

2. Zum Entdecken neuer Elemente, die in der Natur nur spurweise vorkommen. So sah Bunsen in dem Sp. des Lepidoliths zwei intensiv rothe Linien, die keinem bekannten Metall angehören, also einem bis dahin unbekannten, dem Rubidium; so fand er in der Dürkheimer Soole durch 2 blaue Spectrallinien das Caesium. Crookes fand in dem Schlamme mancher Bleikammern (Harz) durch eine grüne Spectrallinie das Thallium (das Schnabelthier unter den Metallen), Reich und Richter in der Freiberger Zinkblende mittels einer tiefblauen Linie das Indium, Lecoq de Boisbaudran in der Blende der Pyrenäen mittels einer violetten Linie das Gallium; in den letzten Jahren ist eine ganze Schaar neuer Elemente in ähnlicher Weise entdeckt worden.

3. Zur Erkennung der Stoffe, der Constitution, der Atmosphäre und der Vorgänge der Himmelskörper. Die Chromosphäre der Sonne, die rosenfarbige Schicht ihrer Dunsthülle, und die Protuberanzen, die rothglühenden Gassäulen, die sich aus der Chromosphäre erheben, zeigen im Sp. vorwiegend die farbigen Wasserstofflinien, bestehen also aus glühendem Wasserstoffgas. In dem Sternbilde der Krone erschien 1866 und in dem Schwan 1876 ein neuer Stern; so lange sie hell waren, sah man in dem Sp. dieser Sterne neben dunkeln Fraunhofer'schen auch helle, farbige Spectrallinien, in dem ersten die von H, in dem letzten die von H, Na und Mg; das Aufleuchten ist also glühenden Gaseruptionen zuzuschreiben. Auch manche Nebelflecken erweisen sich durch ein Liniensp. als Gase und die Kometenhüllen durch ihr Dreibandensp. als in Zersetzung begriffene C-Verbindungen. — Die Absorptionsliniensp. der Sonne und der Fixsterne zeigen wie bekannt, daß diese Weltkörper weißglühende Kugeln von einer Dampfhülle umgeben sind, und die Stellung, Breite und Dunkelheit dieser Linien gibt Aufschluß über den Stoff und die Menge dieser Dämpfe.

4. Zum Messen von Geschw. am Himmel, die durch andere Mittel nicht erforschlich sind, z. B. der Sterne, die eine gegen die Erde hin oder von der Erde weg gerichtete Bewegung haben, der Gasströme auf der Sonne von gleicher Bewegungsrichtung. Diese Messung beruht auf Dopplers Princip (277.). Wie ein Ton durch Annäherung der Tonquelle höher lautet, so muß auch die Farbe einer Lichtquelle sich erhöhen oder erniedrigen, wenn dieselbe sich mit einer solchen Geschw. nähert oder entfernt, die nicht verschwindend klein gegen die des Lichtes ist. Wenn z. B. eine Wasserstofferuption auf der Sonne nach uns zugewendet ist, mag sie nun auf der Mitte der Sonnenscheibe radial ausbrechen oder am Rande derselben eine für die Sonnenoberfläche wagrechte Richtung als Gassturm haben, so wird die Wellenzahl, die in einer Sec. bei uns anlangt, erhöht, die grünblaue F-Linie des Wasserstoffs wird nach dem Violett hin verschoben; wenn sich aber der Wasserstoff von uns entfernt, so wird sie nach dem Roth hin verschoben. Lockyer hat (1868) solche Beobachtungen gemacht und hierdurch nicht bloß bewiesen, daß die Protuberanzen Wasserstoffgasausbrüche sind, welche sowohl Tausende von M. senkrecht in die Höhe schießen, als auch sturmartig wagrecht sich fortbewegen, sondern hat auch sogar eine Geschw. von 32 M. für diese Ausbrüche durch Rechnung gefunden, wobei die Größe der Verschiebung der Spectrallinien die Rechnungsgrundlage bildete. In ähnlicher Weise hat Huggins (1868) aus der Verschiebung der Fraunhofer'schen Linien in dem Sp. des Sirius berechnet, daß dieser Fixstern eine von der Erde weg gerichtete Eigenbewegung von 6 M. Geschw. habe. Airy gab (1881) von 80 St. die Geschw., wie sie in Greenwich gefunden wurden, darunter: Aldebaran 32, Sirius 32, Capella 43^{km} Geschw. von der Erde weg, Arcturus 53, Pollux 42, α des großen Bären 43^{km} Geschw. nach der Erde zu.

5. Das Absorptionssp. dient zur Erkennung aller Stoffe, Elemente oder Verbindungen, organischen oder unorganischen Ursprungs, wenn dieselben sich farbig durchsichtig darstellen lassen, entweder selbst oder in Lösung, Mischung, Verbindung u. s. w. mit anderen Stoffen; die Absorptionsspectralanalyse gewinnt deßhalb ein weites Gebiet zur Aufdeckung der Verfälschung von Farbstoffen, Nahrungs- und Genußmitteln, zur Feststellung von Vergiftungen und anderer Verbrechen, zur Erkennung von Krankheiten, zu physiolo-

Sonnenhülle enthalten sind. Da die Anzahl derselben nicht gering ist, so müssen wir die umkehrende Schicht der Sonnenatmosphäre als ein Gas- und Dampfgemenge ansehen. Nun treten aber bei einem solchen Gemenge von dem geringsten Gemengtheile nur die längsten Linien auf, von dem stärksten Gemengtheile aber auch kurze Linien; wenn daher von einem Element alle oder viele Linien auftreten, so ist es in dem Gemenge in großem Betrage vorhanden; treten nur wenige, nämlich die längsten Linien auf, so ist das Element in geringem Betrage vorhanden. Die Wasserstofflinien sind sämmtlich in dem Sonnensp. umgekehrt vorhanden und zwar die Hauptlinien sehr breit und stark dunkel; von den Eisenlinien sind 450 in dem Sonnensp. umgekehrt; demnach besteht die umkehrende Hülle der Sonne hauptsächlich aus Wasserstoff und Eisendampf. Vom Na sind die D-Linien besonders stark umgekehrt, von Ca 4, von Cr 18, von Ni 39, von Ba 11, von Zn 2, von Co 19, von Mn 57, von Ti 118, von Al 2, von Sr 4, von Pb 3, von Cd 2, von Ce 2, von U 3, von K 3, von V 4, von Pd 5 und von Mo 4 Linien als umgekehrt vorhanden constatirt; folglich sind diese Elemente in geringerer Menge, aber sicher in der umkehrenden Schicht der Sonnenatmosphäre vorhanden. Auch der Atlas von Cornu und die Tabellen von Liveing und Dewar (1883) führen hauptsächlich Linien der genannten Stoffe als im ultravioletten Sonnensp. umgekehrt an, ebenso fallen die Phosphorescenzlinien H. Becquerels (1883) im Ultraroth vorwiegend mit ultrarothen Sonnenlinien jener Elemente zusammen, so daß man jetzt mit einiger Sicherheit behaupten kann, daß die umkehrende Sonnenhülle hauptsächlich aus den genannten Elementen besteht. Jedoch können in dieser Hülle auch unbekannte Elemente enthalten sein, da gar manche Fraunhofer'sche Linien, z. B. selbst die starken A und B, noch nicht als Umkehrungen irdischer Spectrallinien erkannt sind; auch zeigt eine andere Sonnenhülle, die Chromosphäre (564.) eine helle Linie, nahe bei D, welche von den irdischen Elementen nicht bekannt ist, so daß man sie einem eigenen Sonnenstoff zuschreibt, den man deßhalb Helium nennt; sie kommt auch in den Protuberanzen vor und ist im Sp. der Sonnenflecken stark umgekehrt, während ihre Umkehrung unter den Fraunhofer'schen Linien vergeblich gesucht wird; nach Allem darf man wohl sagen, daß die Sonne hauptsächlich aus irdischen Elementen besteht. Da keine Banden in dem Sonnensp. auftreten, so enthält sie keine chemischen Verbindungen, und da außerdem die Linien selbst bei der großen Dicke der Sonnenhülle scharf sind, so muß eine ungemeine hohe Temp. in der Sonne vorausgesetzt werden.

Nur bei tiefem Stande der Sonne, wo der von den Str. durch die Atmosphäre zurückgelegte Weg 15 mal so groß ist als der von Zenithstrahlen, ziehen sich durch das ganze farbige Sp. verwaschene Banden, die auch die Linien A und B verbreitern und verdunkeln und sie noch bandenähnlicher machen als sie sind; bei hohem Sonnenstande verschwinden jene Banden beinahe oder ganz; sie können demnach nur durch Absorption seitens der Erdatmosphäre entstanden sein und heißen daher auch **atmosphärische** oder **terrestrische Linien**. Brewster beobachtete sie zuerst 1833 und gab 1861 mit Gladstone Zeichnungen derselben; er fand auch schon 5 solcher Banden nahe bei A im Ultraroth, deren Wellenlängen Becquerel (1883) nach seiner Phosphorographie von 762 bis 830 angibt; auch die 4 ultrarothen Linien von 930 bis 1470 sind eigentlich Banden, und in Abneys Atlas des Ultraroth machen alle Linien den Eindruck von Banden. Mehrere von diesen Banden fallen nun nach Becquerel (1883—4) mit ultrarothen Linien des Na, Ca und Mg zusammen, wodurch es unwahrscheinlich wird, daß dieselben terrestrisch sind. Janssen hatte nämlich durch Beobachtung des Sp. eines entfernten Feuers über den Genfer See hin (1864), des Sp. einer Gasflamme durch ein 37ᵐ langes wasserdampferfülltes Rohr (1866) und das Sp. eines aufgehenden Sternes (1868) gefunden, daß mehrere der verwaschenen Banden im leuchtenden Sonnenspectrum vom Wasserdampf der Atmosphäre herrühren, während Chappuis (188[illegible]) nach dem Auffinden des Ozonsp. solche diesem Stoffe, dann Egoroff (1882) andere Linien der Luft zuschreibt und Becquerel ultrarothe Banden durch Sonnenstoffe erklärt; demnach sind über diesen Gegenstand entscheidende Forschungen wohl bald zu erwarten.

Piazzi Smyth (1874) beobachtete zuerst, daß vor starkem Regenwetter zwischen den Fraunhofer'schen Linien D und C ganz nahe bei D ein intensiver dunkler Streifen erschien, der bei trockener Luft nicht sichtbar ist und mit der Feuchtigkeit der Luft dunkler wird. Später haben Schellen und Klein noch mehrere solcher **Regenbanden** aufgefunden und Rand Capron hat (1881) angegeben, wie sie zur **Wetterprognose** benutzt werden können. Während die Hygrometer und Psychrometer nur die Feuchtigkeit der Umgebung anzeigen, erhält man durch die Wasserdampflinien, vorausgesetzt, daß sie sicher erkannt und einfach zu beobachten sind, ein Urtheil über die Feuchtigkeit der ganzen Atmosphäre.

325 **Anwendung der Spectral-Analyse.** 1. **Zum raschen Erkennen des Vorhandenseins von Elementen, besonders von Metallen in größeren und geringsten Mengen.** Diese Anwendung beruht auf der unerhörten Empfindlichkeit der Emissionsspectralanalyse; $1/_{3000000}$ mg eines Natriumsalzes genügt, um die gelbe Linie zu erzeugen. Bei anderen Elementen ist die Empfindlichkeit allerdings geringer, aber immer

noch sehr groß; so sind $^{9}/_{1\,000\,000}{}^{mg}$ eines Lithiumsalzes, $^{1}/_{1\,000}{}^{mg}$ eines Kaliumsalzes, $^{9}/_{1000}{}^{mg}$ eines Strontiumsalzes ausreichend, die Linien der Metalle zu erzeugen. Das Natriumsp. ist in jedem anderen Sp. vorhanden, woraus man schließen muß, daß die Luft immer und überall Natrium, wohl als Kochsalz enthält, vielleicht in Gestalt von Sonnenstäubchen, durch das Zerstäuben des Meerwassers hervorgebracht; kein anderes chemisches Mittel gibt von diesem Kochsalzgehalt Kunde. Bringt man das Aschenende einer Cigarre in die Bunsen'sche Flamme, so sieht man mit dem Spectroskop gewöhnlich die Linien von Na, K und Li. In vielen Fällen kann man auf dieselbe Weise, in anderen nach einfacher Vorbereitung erkennen, ob in irgend einem Mineral, einer Bodenart, einer Lösung irgend ein Metall enthalten ist; ja auch P läßt sich auf ähnliche Art nachweisen. So wurde gefunden, daß manche Elemente wie z. B. Li viel weiter verbreitet sind, als man vorher wußte; Bence Jones beobachtete bei einem Staarblinden, daß mit der Nahrung eingenommenes Li schon in $3^1/_2$ Stunden bis in die Krystalllinse gedrungen war.

2. *Zum Entdecken neuer Elemente*, die in der Natur nur spurweise vorkommen. So sah Bunsen in dem Sp. des Lepidoliths zwei intensiv rothe Linien, die keinem bekannten Metall angehören, also einem bis dahin unbekannten, dem Rubidium; so fand er in der Dürkheimer Soole durch 2 blaue Spectrallinien das Caesium. Crookes fand in dem Schlamme mancher Bleikammern (Harz) durch eine grüne Spectrallinie das Thallium (das Schnabelthier unter den Metallen), Reich und Richter in der Freiberger Zinkblende mittels einer tiefblauen Linie das Indium, Lecoq de Boisbaudran in der Blende der Pyrenäen mittels einer violetten Linie das Gallium; in den letzten Jahren ist eine ganze Schaar neuer Elemente in ähnlicher Weise entdeckt worden.

3. *Zur Erkennung der Stoffe, der Constitution, der Atmosphäre und der Vorgänge der Himmelskörper.* Die Chromosphäre der Sonne, die rosenfarbige Schicht ihrer Dunsthülle, und die Protuberanzen, die rothglühenden Gassäulen, die sich aus der Chromosphäre erheben, zeigen im Sp. vorwiegend die farbigen Wasserstofflinien, bestehen also aus glühendem Wasserstoffgas. In dem Sternbilde der Krone erschien 1866 und in dem Schwan 1876 ein neuer Stern; so lange sie hell waren, sah man in dem Sp. dieser Sterne neben dunkeln Fraunhofer'schen auch helle, farbige Spectrallinien, in dem ersten die von H, in dem letzten die von H, Na und Mg; das Aufleuchten ist also glühenden Gaseruptionen zuzuschreiben. Auch manche Nebelflecken erweisen sich durch ein Liniensp. als Gase und die Kometenhüllen durch ihr Dreibandensp. als in Zersetzung begriffene C-Verbindungen. — Die Absorptionsliniensp. der Sonne und der Fixsterne zeigen wie bekannt, daß diese Weltkörper weißglühende Kugeln von einer Dampfhülle umgeben sind, und die Stellung, Breite und Dunkelheit dieser Linien gibt Aufschluß über den Stoff und die Menge dieser Dämpfe.

4. *Zum Messen von Geschw. am Himmel*, die durch andere Mittel nicht erforschlich sind, z. B. der Sterne, die eine gegen die Erde hin oder von der Erde weg gerichtete Bewegung haben, der Gasströme auf der Sonne von gleicher Bewegungsrichtung. Diese Messung beruht auf Dopplers Princip (277.). Wie ein Ton durch Annäherung der Tonquelle höher lautet, so muß auch die Farbe einer Lichtquelle sich erhöhen oder erniedrigen, wenn dieselbe sich mit einer solchen Geschw. nähert oder entfernt, die nicht verschwindend klein gegen die des Lichtes ist. Wenn z. B. eine Wasserstofferuption auf der Sonne nach uns zugewendet ist, mag sie nun auf der Mitte der Sonnenscheibe radial ausbrechen oder am Rande derselben eine für die Sonnenoberfläche wagrechte Richtung als Gassturm haben, so wird die Wellenzahl, die in einer Sec. bei uns anlangt, erhöht, die grünblaue F-Linie des Wasserstoffs wird nach dem Violett hin verschoben; wenn sich aber der Wasserstoff von uns entfernt, so wird sie nach dem Roth hin verschoben. Lockyer hat (1868) solche Beobachtungen gemacht und hierdurch nicht bloß bewiesen, daß die Protuberanzen Wasserstoffgasausbrüche sind, welche sowohl Tausende von M. senkrecht in die Höhe schießen, als auch sturmartig wagrecht sich fortbewegen, sondern hat auch sogar eine Geschw. von 32 M. für diese Ausbrüche durch Rechnung gefunden, wobei die Größe der Verschiebung der Spectrallinien die Rechnungsgrundlage bildete. In ähnlicher Weise hat Huggins (1868) aus der Verschiebung der Fraunhofer'schen Linien in dem Sp. des Sirius berechnet, daß dieser Fixstern eine von der Erde weg gerichtete Eigenbewegung von 6 M. Geschw. habe. Airy gab (1881) von 80 St. die Geschw., wie sie in Greenwich gefunden wurden, darunter: Aldebaran 32, Sirius 32, Capella 43^{km} Geschw. von der Erde weg, Arcturus 53, Pollux 42, α des großen Bären 43^{km} Geschw. nach der Erde zu.

5. *Das Absorptionssp. dient zur Erkennung aller Stoffe*, Elemente oder Verbindungen, organischen oder unorganischen Ursprungs, wenn dieselben sich farbig durchsichtig darstellen lassen, entweder selbst oder in Lösung, Mischung, Verbindung u. s. w. mit anderen Stoffen; die Absorptionsspectralanalyse gewinnt deßhalb ein weites Gebiet zur Aufdeckung der Verfälschung von Farbstoffen, Nahrungs- und Genußmitteln, zur Feststellung von Vergiftungen und anderer Verbrechen, zur Erkennung von Krankheiten, zu physiolo-

gischen Forschungen u. s. w. Einige Beispiele mögen eine Idee dieser Anwendungen geben. Wird eine Probe von Ultramarin mit Lackfirniß aufgeschlämmt, so zeigt eine Sorte im Absorptionssp. ein brillant rothes Band von A bis B, eine andere Sorte hat dieses Band nur schwach, eine dritte gar nicht. Der Fabrikant kann daher aus dem Absorptionssp. mit einem Blicke erkennen, ob die Stoffe der Mischung beim Ultramarin-Brennen richtig reagirt haben. — Das künstliche Alizarin hat keine Absorptionsstreifen, das natürliche aber die deutlich erkennbaren Streifen des Purpurins. — Ist rother Wein z. B. mit dem Beerensaft von Flieder, Rainweide oder Malve gefärbt, so entstehen nach vorsichtigem Neutralisiren mit Alaun und schwachem Ansäuern mit Essigsäure im Absorptionssp. verwaschene Streifen in der Gegend der Linie D, was beim echten Rothwein nicht geschieht. — Nach Sorby kann mittels des Sp. sogar das Alter des Weins gefunden werden. — Auch der Farbstoff von Malz und Hopfen kann von dem falschen der Colombowurzel, der Pikrinsäure und der Gelbwurz im Biere mittels des Absorptionssp. unterschieden werden. — Die Reinheit von Milch, Butter, Safran, Rhabarber u. s. w. läßt sich durch Absorptionsstreifen erkennen. — Ist irgend ein Stoff mit Blut gemischt, so erzeugt eine alkalische Lösung desselben auf Zusatz von Ammoniumhydrosulfid zwei außerordentlich kräftige Absorptionsstreifen zwischen D und E und zwischen E und b, welche Reaction zur Erkennung des Blutes in gerichtlichen Fällen die wichtigste ist. Das Sp. von Blut, das mit Kohlenoxyd geschwängert ist, bleibt bei Zusatz von Schwefelammonium unverändert, wodurch es leicht möglich wird, Vergiftungen des Blutes mit Kohlenoxyd nachzuweisen. — Ebenso kann das Vorhandensein von Galle im Blut durch die eigenthümlichen Absorptionsstreifen der Galle nachgewiesen und dadurch die Gelbsucht erkannt werden, sowie durch das Vorhandensein von Eiweiß im Harn die Bright'sche Nierenkrankheit u. s. w.

6. Zum Studiren des Verlaufes chemischer und technischer Processe. Beim Titriren mit Kaliumpermanganat (Chamäleon) auf Eisenoxydul neben viel Eisenoxyd ist die Rosenfärbung kein sicheres Zeichen des Endpunktes der Reaction, wohl aber das Auftreten der Absorptionsstreifen der Hypermangansäure. — Ebenso dienen die Spectrallinien zum Erkennen des Endpunktes der Bessemerstahlbereitung. Bessemers Verfahren zur Stahlbereitung besteht nämlich darin, daß durch das geschmolzene Gußeisen atmosphärische Luft in feinen Strömen so lange durchgepreßt wird, bis von den 5% Kohlenstoff des Gußeisens durch Verbrennung nur noch 2% vorhanden sind. Man erkennt dies an dem Auftreten und raschen Verschwinden von 4 blauen und 1 violetten Linie im Sp. der über dem kochenden Eisen schwebenden, sogenannten Bessemer-Flamme.

7. Zur quantitativen Analyse von Stoffen, die ein Absorptionssp. zu bilden im Stande sind. Nach 323. ist die Concentration einer Lösung, der Gehalt einer Flüssigkeit an färbender oder absorbirender Substanz dadurch zu bestimmen, daß man das Absorptionsverhältniß A dieser Substanz, das eine constante Größe ist, mit dem Extinctionscoëff. multiplicirt. Um den Extinctionscoëff. aufzufinden, muß untersucht werden, wie viel Licht eine 1cm dicke Schicht der Lösung absorbirt. Zu diesem Zwecke theilt Vierordt den Spalt eines Spectroskops in zwei über einander befindliche Hälften, setzt vor die untere Spalthälfte den zu untersuchenden Körper, und verengert dann durch Drehung an feinen Schrauben, die mit einer großen getheilten Trommel versehen sind, die obere Spalthälfte so lange, bis ihr Licht nur noch ebenso stark ist, wie das nach der Absorption übrig gebliebene Licht der unteren Hälfte. Ist z. B. die obere Spalthälfte auf 30° eingestellt, so ist die Lichtstärke nur noch 0,30 der ursprünglichen; hieraus ist der Extinctionscoëff. zu berechnen. Diese Methode der quant. An. ist schon bedeutend verbessert worden und wird gewiß noch auf den höchsten Grad der Einfachheit, Raschheit und Genauigkeit gebracht. Praktisch angewendet wird dieselbe schon zur Bestimmung der entfärbenden Kraft der Knochenkohle.

326 **Die Körperfarben** entstehen dadurch, daß ein Körper einzelne Farbenbestandtheile des auftreffenden und in ihn eindringenden Lichtes absorbirt und die übrig bleibenden zurückwirft, oder theils zurückwirft, theils durchläßt; im ersten Falle ist er farbig undurchsichtig, im letzten farbig durchsichtig. Die Absorption geschieht schon in der obersten Schicht des Körpers, die Reflexion von den unter dieser Schicht liegenden Molekülen; sie ist daher selbst an den glättesten Körpern eine diffuse. Wenn das Licht theilweise durchgeht, so wird in den tieferen Schichten noch mehr Licht absorbirt als in den obersten, aber doch nur Licht von derselben Farbe; daher erscheint ein farbig durchsichtiger Körper im durchgelassenen Lichte in denselben Farben wie im reflectirten Lichte; durch ein blau aussehendes Glas erscheint auch die Welt blau.

Läßt man auf farbiges Papier, das bekanntlich seine Farbe nur einer dünnen Schicht verdankt, im Dunkeln ein Sonnensp. fallen, so erscheint nur der Theil des Sp. hell, der mit der Farbe des Papiers übereinstimmt oder derselben ähnlich ist; die übrigen Theile aber erscheinen dunkel oder nur schwach erhellt; hieraus ersieht man, daß die dünne Oberflächen-

schicht schon die Absorption vollzieht, daß sie einen Theil der Farben absorbirt, den anderen nicht. Dieser nicht absorbirte Theil wird vereinigt zurückgeworfen und bildet die Körperfarbe beim Daraufsehen; geht derselbe theilweise weiter, so bildet dieser Theil die Körperfarbe beim Durchsehen. Die diffus reflectirten Farben kommen von tiefer liegenden Mol.; sie vereinigen sich noch mit dem Lichte, das an der äußersten Oberfläche reflectirt wird. Nur die Metalle und die Körper mit Oberflächenfarben haben ihre farbige Reflexion schon an der äußersten Oberfläche (Jamin 1848), was jedoch Quincke (1867) bestreitet (483.).

Ein *durchsichtiger Körper* ist farblos durchsichtig, wenn er alle Bestandtheile des auffallenden Lichtes in demselben Verhältnisse durchläßt, wie sie in dem Lichte selber gemischt sind. Er ist blau durchsichtig, wenn er einen Theil der Str. absorbirt und nur solche Str. durchläßt, die in unserem Auge den Eindruck des Blau hervorbringen. So werden z. B. von Lösungen der Kupferoxydsalze die rothen und gelben Str. vorzugsweise absorbirt, die blauen vorzugsweise, die grünen und violetten schwächer durchgelassen; daher erscheinen solche Flüssigkeiten blau. Am einfachsten lassen sich die absorbirten und die durchgelassenen Farben unterscheiden, wenn man vor das Spectroskop von Steeg eine von dessen durchscheinenden, farbigen Gelatinefolien hält. Die gelben Farbstoffe lassen gelb ungeschwächt, roth und grün schwächer durch, absorbiren aber blau und violett. Die Mischung einer blauen und einer gelben Flüssigkeit absorbirt daher die rothen, gelben, blauen und violetten Str., läßt nur die grünen einigermaßen durch und erscheint daher im durchgelassenen Lichte grün. Eine Combination von Steeg, bestehend aus einer gelben und einer blauen Gelatinefolie, die an 2 Stellen frei, an einer über einandergelegt sind, zeigt mit dem Spectroskop deutlich, warum hier aus Gelb und Blau Roth entsteht, daß also die Mischung der Körperfarben sehr verschiedene Resultate hat. Eine Verbindung eines grünen mit einem rothen Glase erscheint fast undurchsichtig, weil das erste fast alle Str. mit Ausnahme der grünen und das letzte fast alle mit Ausnahme der rothen verschluckt, so daß die aus dem grünen Glase tretenden Str. in dem rothen vernichtet werden; ähnlich ist es bei der Verbindung eines blauen und orangen oder eines gelben und violetten Glases. Ganz undurchsichtig werden solche Verbindungen nicht, weil die Abs. nicht vollständig ist, weil also nie aus einem Glase eine wahrhaft homogene Farbe kommt. Wird ein farblos durchsichtiger Körper zu Pulver zerstoßen, so werden, da er nicht absorbirt, von den Flächen der Theilchen alle Strahlenbestandtheile des auffallenden weißen Lichtes nach allen Richtungen reflectirt und zwar meist total reflectirt; daher erscheint das Pulver weiß. Wird ein farbig durchsichtiger Körper zu Pulver zerstoßen, so wird er wegen der totalen Reflexion ebenfalls undurchsichtig und hat dieselbe Farbe wie im ganzen Zustande, nur mehr weißlich wegen der Zumischung des total reflectirten weißen Lichtes. Ein Farbenpulver ist um so dunkler und gesättigter, je gröber es ist; um so dunkler, weil die Menge des total reflectirten weißen Lichtes mit der Zahl der Theilchen wächst, und um so gesättigter, d. i. um so reiner und reicher in seiner Farbe, weil die Menge der verunreinigenden, absorbirten Farbe mit der Dicke der Theilchen zunimmt.

Ein *undurchsichtiger Körper* ist weiß, wenn er alle Bestandtheile des auf ihn fallenden Sonnenlichtes in hohem Betrage und in gleichem Maße zurückwirft, wie sie in dem Sonnenlichte enthalten sind, wenn er also nur kleine Beträge absorbirt; einen absolut weißen Körper, d. i. einen solchen, der gar kein Licht absorbirt, gibt es nicht. Ein Körper ist schwarz, wenn er alle Bestandtheile des auf ihn fallenden weißen Lichtes absorbirt und demnach kein Licht zurückwirft; das Auge und die optischen Instrumente haben schwarze Innenwände, damit keine Störung durch reflectirtes Licht entstehe. Absolut schwarze Körper gibt es indessen ebenfalls nicht; glatte, spiegelnde Stellen schwarzer Körper reflectiren das weiße Licht, sind daher weiß oder höchstens grau. Grau ist ein lichtschwaches Weiß; ein Körper ist grau, wenn er zwar alle Bestandtheile des weißen Lichtes in dem richtigen Maße, aber in geringem Betrage zurückwirft. Ein Körper erscheint farbig, wenn er einen Theil der auf ihn fallenden Farbenbestandtheile weißen Lichtes absorbirt und den übrigen Theil zurückwirft. Eine und dieselbe Farbe könnte dann aber auf zweierlei Weise entstehen: z. B. ein Körper könnte dadurch gelb sein, daß er alle Farben mit Ausnahme des Gelb absorbirte und nur das Gelb zurückwürfe, oder auch dadurch, daß er nur das Violett absorbirte und alle übrigen Farben zurückwürfe, die zusammen dann den Eindruck von Gelb hervorbrächten. Diese beiden idealen Fälle kommen in der Natur kaum vor; die natürlichen und künstlichen Farben sind nicht homogen, sie bestehen aber auch nicht aus einer gleichmäßigen Mischung aller Spectralfarben mit Ausnahme einer einzigen; sie enthalten vielmehr meist eine Spectralfarbe in größerer Menge gemischt mit einer geringeren Menge der ähnlichen und einer noch geringeren Menge unähnlicher Farben, was sich durch Spectralanalyse eines jeden beliebigen schmalen Farbenstreifens ergibt. — Daß trübe Medien, wie Milchglas, eine sehr dünne Goldschicht, die Iris und dergl. im durchgelassenen Lichte eine andere Farbe zeigen als im auffallenden Lichte, im durchgelassenen Lichte meist gelblich, im auffallenden bläulich erscheinen (*Goethes Urphänomen*), erklärt sich nach Brücke (1852)

durch die Interferenz des Lichtes, welche durch die trübenden kleinen Theilchen des Mediums veranlaßt wird (369.).

Aus dem Vorausgehenden ist schon ersichtlich, daß die Körperfarbe vor Allem von dem auffallenden Lichte abhängt; ohne Licht gibt es keine Farbe und mit der Farbe des auffallenden Lichtes ändert sich auch die Körperfarbe, woraus zugleich folgt, daß die Farben keine reale Existenz haben, sondern nur Erzeugnisse des auffallenden Lichtes sind. Fällt auf einen Körper nur homogenes Licht, so erscheint er hell in der Farbe dieses Lichtes, wenn er dasselbe nicht absorbirt, dagegen schwarz, wenn er dieses Licht verschluckt; im Lichte von Spiritus, der Kochsalz gelöst enthält, erscheint alles Weiße und Gelbe hell, die meisten übrigen Farben aber sind schwarz. Im Kerzen- oder Lampenlichte, das wegen Mangels blauer Str. gelb ist, erscheinen Gelb und Weiß gleich und Blau sieht aus wie Grün. Läßt man Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer fallen und durch ein mit Kupferoxydul roth gefärbtes Glas oder durch ein blaues Kobaltglas gehen, so erscheinen durch das erste nur rothe, durch das letzte nur blaue und rothe Körper farbig hell, die übrigen aber schwarz, ebenso wie durch das rothe Glas gesehen nur das Weiße und Rothe hell, die verwandten Farben weniger hell, die nicht verwandten, wie Grün und Blau, schwarz auftreten, während durch das blaue Glas alles Gelbe und Grüne schwarz aussieht.

Eine lehrreiche Anwendung der Absorption sind das Erythrophytoskop von Simler und Wild (1862), das Erythroskop und das Melanoskop von Lommel (1871). Betrachtet man ein grünes Gebüsch durch ein Spectroskop, so sieht man sehr intensiv das Roth vor B, zwischen B und C ein dunkles Band, dann wieder deutlich das übrige Roth, das Orange und Gelb, schwächer schon Grün und Blau, dagegen ist die Stelle von Indigo und Violett ganz dunkel; dieselbe Erscheinung beobachtet man, wenn man das Licht durch ein Blatt oder eine Lösung von Blattgrün (Chlorophyll) gehen läßt und dann mit dem Spectroskop untersucht. Hieraus folgt, daß die Pflanzen das Roth zwischen B und C stark absorbiren (Lommel glaubt, daß diese Strahlen den Assimilationsproceß besorgen), ebenso stark Violett und Blau, daß also die grüne Farbe der Pflanzen ein Gemisch von Dunkelroth, Hellroth, Orange, Gelb, etwas Grün und Hellblau ist, da die Pflanzen diese Farben nicht absorbiren, sondern reflectiren und durchlassen. Das Erythrophytoskop (ἐρυθρός, roth; φυτόν, Pflanze) besteht aus einer Brille, deren Gläser aus je einer blauen Kobaltglasplatte und einer gelben Eisenoxydglasplatte zusammengesetzt sind; das erste Glas läßt eben das Dunkelroth, welches die grünen Blätter reflectiren, ungeschwächt durch, ebenso das zweite Glas, da dieses das ganze Roth durchläßt; das Hellroth der Blätter jedoch wird von dem ersten Glase absorbirt, ebenso das Orange und Gelb, während das zweite Glas das Blau der Blätter absorbirt; es gelangt daher von der Farbenmischung der Blätter nur das Dunkelroth und Grün ins Auge, gemischt mit einigen gelbgrünen Str., da das Kobaltglas eine bestimmt gelbgrüne Strahlengattung durchläßt, welche Mischung den Blättern eine korallenrothe Färbung ertheilt; durch das Erythrophytoskop erscheint also die Pflanzenwelt korallenroth; der Himmel erscheint durch dasselbe cyanblau, Erde und Wolken violett. Eine Combination des blauen Kobaltglases mit einem dunkelrothen Glase läßt nur die dunkelrothen Pflanzenstr. durch; daher erscheint durch dieselbe, das Erythroskop, die Pflanzenwelt roth, die übrige Natur dunkel. Eine Combination eines dunkelrothen Rubinglases mit einem violetten Glase, Melanoskop genannt, läßt die Pflanzenwelt dagegen schwarz erscheinen. — Um die hier auftretenden Farbenerscheinungen im voraus angeben zu können, muß man die Theorie der Mischfarben kennen.

327 **Die Mischfarben** (Helmholtz, physiologische Optik 1867). Unter Mischfarbe versteht man den Farbeneindruck, der durch das Zusammentreffen mehrerer einfachen Farben an einer Stelle der Netzhaut des Auges hervorgebracht wird. Dieser neue Eindruck ist ein einheitlicher und läßt die Bestandtheile nicht erkennen. Methoden der Farbenmischung sind: 1. Man bringt verschiedene Spectra oder verschiedene Theile desselben Spectrums zum Decken. Einen Apparat zur bequemen Ausführung dieser Methode gab Smith (1873) (s. unten) an. 2. Man blickt durch eine ebene Glastafel in schräger Richtung nach einer farbigen Fläche, während die dem Beobachter zugewendete Seite der Glastafel ihm gleichzeitig Licht eines andersfarbigen Objectes durch Reflexion zusendet (Lamberts Versuch 1772). 3. Man läßt Scheiben schnell rotiren, auf denen verschiedenfarbige Sectoren angebracht sind; ist die Rotation schnell genug, so haftet der Eindruck der ersten Farbe noch im Auge, wenn der einer folgenden dazu kommt (Farbenkreisel). Nicht richtig ist die Methode der Mischung von Farbstoffen; denn hierdurch entsteht keine Addition, sondern eine Subtraction von Farben, indem der eine Farbstoff einen Theil der Spectralfarben

absorbirt, die bei der Absorption durch den anderen übrig bleiben. Spectrales Gelb und Indigo geben gemischt Weiß, nicht aber Grün, wie es durch Mischung eines gelben und eines blauen Farbstoffes entsteht, weil nämlich der erste die blauen und violetten und der letzte die rothen und gelben Strahlen absorbirt, so daß nur die grünen übrig bleiben; in Steegs Gelatine-Combination entsteht sogar Roth durch Mischung von Gelb und Blau. Durch Anwendung der richtigen Mischmethoden entsteht nun zunächst aus den Spectralfarben eine neue Reihe von Farben, nämlich Purpur, Weiß und Uebergangsstufen von Weiß in Purpur und in die Spectralfarben.

Purpur ist die Mischung der zwei äußersten Spectralfarben, Roth und Violett; mischt man statt des letzten die vorletzten, Blau und Orange, so entsteht Rosaroth, ein weißliches Purpur. Das Purpur bildet für das Auge einen Uebergang zwischen den offenbar verwandten Farben Roth und Violett, so daß bei Einschaltung des Purpur die Spectralfarben in einen Kreis geordnet werden können. — Weiß entsteht nicht blos durch Mischung aller Spectralfarben, sondern es ist auch der Eindruck einer jeden einzelnen Farbe in ihrer höchsten Intensität, es entsteht aber auch durch Mischung von zwei und von drei Spectralfarben. Nimmt man nämlich aus dem Spectrum das Roth heraus und mischt die übrigen Farben, so entsteht ein Grünlichblau, dessen Mischung mit jenem Roth natürlich wieder Weiß hervorruft. Mischt man nun mit dem Roth nicht dieses heterogene Grünlichblau, sondern die Spectralfarbe Grünlichblau, so entsteht ebenfalls Weiß. Zwei Farben, die zusammen Weiß geben, nennt man Complementärfarben. Solche sind außer Roth und Grünlichblau auch Orange und Cyanblau, Gelb und Indigo, Grünlichgelb und Violett. Das Grün des Spectrums hat keine homogene Complementärfarbe, sondern eine zusammengesetzte, nämlich Purpur; also entsteht Weiß auch durch Vereinigung von Grün, Roth und Violett. Die Wellenlängen der Complementärfarben stehen ebenso wenig in einem einfachen Verhältnisse zueinander wie die Intensitäten derselben; während die Intensität von complementärem Cyanblau ungefähr derjenigen des Orange gleich ist, bedürfen Gelb und Grün einer größeren Intensität als Violett und Indigo, um diesen complementär sein zu können.

Fig. 214.

Der Apparat von Smith zur Mischung der Spectralfarben ist in Fig. 214 im Durchschnitt abgebildet. Mittels der Rolle b wird die Achse derselben, sowie die Scheibe aa, der schiefe Spiegel c und das Prisma d in rasche Rotation gesetzt; die durch den Schlitz g auf den Spiegel c fallenden Str. x werden durch diesen in die Richtung y auf das Prisma reflectirt, nach der Zerlegung auf der kegelförmigen Scheibe f f aufgefangen und bei hinlänglich rascher Rotation zu einem einheitlichen Eindruck vereinigt. Bei e sind Schieber angebracht, um beliebige Spectralfarben abblenden und so die Mischung der übrigen studiren zu können.

Durch die Mischung zweier nicht complementären Spectralfarben entstehen Zwischenstufen, die durch Weiß geschwächt und daher, wie man sagt, weniger gesättigt sind als die reinen Spectralfarben. Mischt man zwei Farben, die weniger weit im Sp. von einander stehen als Complementärfarben, so ist die Mischung eine der zwischenliegenden Farben und zieht desto mehr ins Weiße, je größer ihr Abstand ist, wird dagegen desto gesättigter, je kleiner ihr Abstand ist. Mischt man aber zwei Farben, die im Sp. weiter von einander stehen als Complementärfarben, so erhält man Purpur oder solche Farben, die zwischen einer gemischten und dem entsprechenden Ende des Sp. liegen, und um so gesät-

Stellen des Sonnensp., wo es überhaupt fluorescirt, in demselben Gelb, das überall aus Hellroth, Orange und Gelb zusammengesetzt ist; also erregt jeder wirksame Str. alle Farben des Fluorescenzlichtes; demnach erregt die Stelle bei a nicht blos die niederen Farben zwischen c und a, sondern auch die gleichen bei a und die sämmtlichen höheren von a bis d. In der ersten Klasse findet folglich nicht blos eine Erniedrigung, sonder auch eine Erhöhung der Schwz. statt; es hat also hier die Stokes'sche Regel: das absorbirte Licht bilde die obere Grenze des Fluorescenzlichtes, keine Geltung. Im Magdalaroth bringen die absorbirten hellrothen Str. auch orange und gelbe Fluorescenz hervor. Eine schwache Absorption hat dasselbe auch im höheren Theile des Sp., so daß die gelbe Fluorescenz auch dort auftritt, jedoch schwächer; hier findet Absorption durch die tieferen Octaven statt, die dann ebenfalls die hellrothen, orangen und gelben Farben erregen.

Fig. 217.

Zur zweiten Klasse gehören die fluorescirenden Substanzen, die einseitige Absorption im höheren Theile des Sp. haben und daher gelblich, bräunlich oder farblos sind; sie fluoresciren meistens blau, und ihre Fluorescenz soll nur durch indirecte Absorption als Differenzfarbe entstehen; jeder erregende Str. bringt seine Schwz., aber auch dessen tiefere Octave hervor, und diese tieferen Farben bilden mit den höheren Str. Combinationsfarben, deren Schwz. gleich der Differenz der Schwzn. der beiden ersten Str. ist. So erzeugt ein unsichtbares Ultraviolett von 900 Bill. Schw. mit dem unsichtbaren Ultraroth von 400 Bill. ein sichtbares Orange von 500 Bill. Schw. Deßhalb ist das Fluorescenzlicht dieser Klasse sehr zusammengesetzt, sein Sp. zeigt alle Farben. Da die Differenz immer kleiner ist als der Minuend, so ist die Schwz. des Fluorescenzlichtes niedriger, als die des erregenden, die Stokes'sche Regel gilt hier durchweg. Die Färbung des Fluorescenzlichtes ist nicht überall genau dieselbe und ändert sich etwas mit der Farbe des erregenden Lichtes. Die Körper dritter Klasse, wie Orseille, Lackmus u. a. bilden ein Fluorescenzsp., das aus 2 Theilen besteht, einem gleichfarbigen, der Stokes'schen Regel nicht folgenden, und einem anders gefärbten mit allmäliger Farbenänderung, welches der Stokes'schen Regel entspricht.

330 **Die Phosphorescenz** (281.) unterscheidet sich von der Fluorescenz hauptsächlich hinsichtlich der Zeit; sie tritt erst nach dem Beginne der Bestrahlung ein und verlöscht erst nach dem Aufhören derselben; wenn daher die Fluorescenz mit der Resonanz verglichen werden kann, so findet die Phosphorescenz ihre Analogie in dem Mittönen. Doch gibt es auch noch andere Unterschiede. Die Fluorescenz entsteht nur durch Bestrahlung, die Phosphorescenz aber auch durch Erwärmung, mechanische Processe u. s. w.; die Fluorescenzfarbe eines Körpers ist immer dieselbe, die Phosphorescenzfarbe aber ändert sich oft mit der Temperatur, oft mit der physikalischen Beschaffenheit, mit der Darstellungsweise des Körpers, mit der Farbe des erregenden Lichtes; die Fluorescenz zeigt sich, abgesehen von den Fraunhofer'schen Linien, an allen Stellen des wirksamen Spectrumtheils, die Phosphorescenz wird von den höheren Farben des Spectrums erregt, durch die niederen aber verlöscht. Beide stimmen darin überein, daß die Bestrahlung durch die violetten und ultravioletten Strahlen vorzugsweise wirksam ist, und daß die Schwingungszahl meist erniedrigt wird.

Schon bei ihren früheren Untersuchungen hatten Becquerel Vater und Sohn gefunden, daß die Phosphorescenz von den höheren Farben erregt, von den niederen ausgelöscht werde; später wurde von den erregenden das Ultraviolett, von den auslöschenden das Ultraroth als besonders wirksam erkannt, und H. Becquerel gründete darauf seine Methode, die ultrarothen Fraunhofer'schen Linien leuchtend im Dunkel und die ultrarothen Spectrallinien der Dämpfe dunkel im Hell hervorzuheben und ihre Wellenlängen zu messen. Dreher und Gädicke haben (1881) die neuen Leuchtfarben dem Sonnenlichte ausgesetzt, das durch Glaskugeln, mit Wasser, Alaunlauge, Jodlösung oder Aeskulinlösung gefüllt, gegangen war; hinter den zwei ersten Flüssigkeiten leuchteten die Tafeln, hinter den zwei letzten nicht, indem erstere die ultrarothen Strahlen durchlassen, letztere nicht; auch eine dunkelblaue Glasplatte zwischen Sonne und Tafel bewirkte ein lebhaftes Leuchten, eine rothe oder gelbe aber nicht. Als die Tafeln durch directe Insolation lebhaft leuchteten und dann theilweise mit gelbem oder grünem Glase, anderentheils mit undurchsichtigen Pappscheiben bedeckt abermals der Sonne ausgesetzt wurden, leuchteten die letzten Theile noch, die ersteren aber nicht

mehr; Gelb und Grün verlöschen also auch die Phosphorescenz. Wurden die 4 Kugeln in ähnlicher Weise benutzt, so wurde das Leuchten hinter Wasser und Alaun verstärkt, hinter Jod und Aesculin aber ausgelöscht, womit das Verlöschen durch ultrarothe Str. abermals dargethan war, da Jod nur diese durchläßt. Da das Aesculin stark fluorescirt, aber nicht phosphorescirt, ja das Phosphoresciren und seine Str. verlöscht, so könnte man hierin einen großen Unterschied zwischen Fluorescenz und Phosphorescenz vermuthen; es ist jedoch das gerade Gegentheil der Fall. In dem Lichtkegel, der in Chininlösung eindringt, ist nur der stumpfe Anfang blau; in dem, der in das grünliche Saphiringlas dringt, nur die Basis roth u. s. w.; die Fluorescenz findet nur in der äußersten Oberfläche statt; die Fluorescenz wird also ebenfalls und zwar schon durch die dünnste Schicht des fluorescirenden Körpers aufgehoben, ist also hierin der Phosphorescenz analog. Demnach spricht diese Thatsache für die jetzt viel verbreitete Ansicht, daß die Erscheinungen nur in der Zeit verschieden seien, weßhalb manche Autoren die beiden Bezeichnungen oft für einander gebrauchen. Jedoch zeigten Dreher und Gädicke, daß, wie es nach ihrer Theorie (281. 2) sein muß, die Phosphore während der Insolation nicht leuchten.

331 **Die anomale Dispersion** (Kundt 1871). Körper mit Oberflächenfarben haben die Eigenschaft, niedrige Farben wie Roth, Orange, Gelb, statt schwächer, stärker zu brechen als die höheren Farben z. B. Blau und Violett; das Spectrum solcher Körper beginnt gewöhnlich mit den höheren Farben Blau und Violett, zeigt dann eine dunkle Lücke, und enthält am stärker gebrochenen Ende die niedrigen Farben Roth bis Gelb. Diese Eigenschaft der Körper mit Oberflächenfarben, niedrige Schwingungszahlen gegen die Regel stärker zu brechen als höhere, nennt man die anomale Dispersion. Körper mit Oberflächenfarben sind solche, die im reflectirten Lichte mit anderer Farbe erscheinen als im durchgelassenen, bei denen also die Körperfarbe nicht erst nach einer Absorption in den obersten Molekülschichten durch Reflexion gebildet wird, da sonst im reflectirten Lichte dieselbe Farbe wie im durchgelassenen erscheinen müßte, sondern welche ihre Farbe durch Reflexion an der äußersten Grenzfläche erhalten, wodurch der Name Oberflächenfarbe erklärlich ist. Diese starke Reflexion ist nur dadurch erklärlich, daß diese Körper für jene Farben totale Reflexion, also sehr große Brechungsexponenten besitzen, und dies ist nur dadurch möglich, daß die Geschwindigkeit dieser Farben in dem Körper sehr gering ist, daß also das Licht sich so gut wie nicht durch diese Körper fortpflanzt, was wieder nur dann erklärlich ist, wenn die Körper für jene Farben eine sehr starke Absorption besitzen. Kundt hat nun in der That gezeigt, daß die Körper mit Oberflächenfarben gerade diese Farben total absorbiren, und daß der Brechungsexponent derselben unendlich groß ist; an dieser Vergrößerung des Brechungsexponenten haben aber nicht nur die absorbirten, sondern auch die niedrigeren Farben Antheil, wodurch sich ihre stärkere Brechung erklärt.

Leroux hatte schon 1862 gefunden, daß Joddampf die rothen Str. stärker bricht als die blauen; außerdem hatte schon Cauchys Dispersionstheorie in Verbindung mit Jamins Versuchen über die Metallfarben ergeben, daß auch die Metalle die umgekehrte Dispersion der durchsichtigen Körper besitzen. Endlich beobachtete Christiansen (1870), daß eine alkoholische Lösung von Fuchsin, in ein sehr spitzes Hohlprisma gebracht, ein anomales Sp. erzeugt, das mit Blau und Violett beginnt, in welchem Grün fehlt, und das mit Roth und Gelb endigt; er bestimmte auch die B.-E. einer concentrirten Lösung und fand dieselben für Roth 1,45, Gelb 1,52, Blau 1,34, Violett 1,37. Kundt kam sogleich, wohl durch die obige Schlußweise geleitet, auf den Gedanken, die anomale Dispersion in allen Körpern mit Oberflächenfarben zu vermuthen, und fand diese Vermuthung durch Versuche überall bestätigt.

Oberflächenfarben sind auch im gewöhnlichen Leben, z. B. am festen Indigo bekannt, der aus einer rauhen Oberfläche also aus seinem Inneren die bekannte blaue Farbe schickt, die er auch in Lösung zeigt, an einer glatt geriebenen Oberfläche aber ein complementäres Orangeroth zeigt, das eben als Oberflächenfarbe metallisch, wie kupferroth aussieht. Da die Oberflächenfarbe nach obigem Schlusse auch absorbirt wird, so kann sie in dem durchgegangenen Lichte nicht mehr enthalten sein; daher ist die Oberflächenfarbe wie beim Indigo der inneren oder durchgelassenen complementär; läßt man auf einer Glasplatte eine Lösung des Fuchsins rasch verdunsten, so erscheint dieselbe im reflectirten Lichte grün, im durchgelassenen roth. Auch alle Anilinfarben, sowie Kaliumpermanganat haben den falschen Schiller der Oberflächenfarben und bewirken alle nach Kundt eine anomale Dispersion. Da diese

Körper nur in den dünnsten Schichten durchsichtig sind, so kann man ihr Sp. nur an der Kante eines sehr spitzwinkeligen Prismas untersuchen, was indessen eine neue Beobachtungsmethode von Soret nicht nöthig macht.

In dem anomalen Sp., das nach diesen Methoden erhalten wird, fehlt immer die Oberflächenfarbe, wodurch nachgewiesen ist, daß sie absorbirt wird, daß also ihre Geschw. in dem Körper sehr gering ist. Hierdurch wird der B.-E. c / c′ sehr groß, für c′ gleich Null sogar unendlich. Wirklich zeigen die Untersuchungen Kundts, daß die B.-E. der niederen Farben nach der absorbirten Farbe zu sehr rasch wachsen, daß ihre Dispersionscurve gegen die Lücke zu fast assymptotisch ansteigt. Sellmeier hatte eigentlich die ganze Erscheinung schon 1866 theoretisch vorausgesagt, indem er von dem Gedanken ausging, daß die Absorption ein Uebergang auf die Körpermol. sei und daß mit derselben eine unendliche Erhöhung des B.-E. für die absorbirten Farben verbunden sein müsse, woraus er schloß, daß auch die B.-E. der niederen Farben erhöht und der höheren erniedrigt würden.

Kundt beobachtete (1880), daß auch glühender Natriumdampf für diejenigen Str. anomale Dispersion hat, die in der Nachbarschaft der D-Linie liegen, also in der Nachbarschaft der Strahlen, die er emittirt oder für die er auswählende Absorption besitzt; vor dieser Stelle steigt der B.-E. rasch und hinter ihr ist er viel kleiner und nimmt dann wieder rasch zu. Nach Kundt muß folglich Natriumdampf jene gelben Str. auch stark reflectiren; hieraus würde folgen, daß z. B. ein Komet ein Liniensp., ohne selbstleuchtend zu sein, haben könnte, wenn er nämlich für einzelne Partieen des auftreffenden Sonnenlichtes auswählende Absorption besäße und daher diese Partieen vorzugsweise reflectirte.

332 **Chemische oder aktinische Wirkung des Lichtes.** Wie bei der gewöhnlichen Absorption des Lichtes eine Verwandlung von Licht in Wärme stattfindet, so ist auch eine Verwandlung von Licht in Arbeit denkbar, d. h. die Aetherschwingungen können, indem sie auf Körperatome übergehen, diese Atome weiter von einander entfernen und dadurch eine chemische Zersetzung bewerkstelligen. Indeß ist es auch möglich, daß durch die Aetherschwingungen die Körperatome ebenfalls in Schwingungen versetzt werden, und daß hierdurch insbesondere die fortschreitenden Gasatome noch schwingende Bewegungen annehmen; dies kann die Folge haben, daß in Gemengen verschiedener Gase die verschiedenen Atome einander genähert werden und sich dann einander festhalten. So können durch Licht auch chemische Verbindungen befördert werden. Unter welchen Umständen diese Erscheinungen stattfinden, hängt von der materiellen Verschiedenheit ab, deren Wesen uns unbekannt ist.

Chemische Zersetzungen durch das Licht sind: das weiße Chlorsilber wird durch das Licht geschwärzt, indem das Cl entweicht und das Ag in kleinsten Theilchen zurückbleibt; wenn das Licht nur kurze Zeit auf das Ag Cl eingewirkt hat, so wird dasselbe von reducirenden Stoffen leichter zersetzt als vom Lichte unberührtes Silbersalz; ähnlich verhält sich Jodsilber; hierauf beruht die Photographie (358). Salpetersäure wird im Lichte gelb, nach längerer Zeit roth, weil sie sich in NO_2 und O zersetzt. Organische Farbstoffe zersetzen sich unter dem Einflusse des Lichtes, indem ihr C und ihr H sich mit dem ozonisirten O der Atmosphäre verbinden; hierauf beruht das Bleichen, sowie manche andere Farbenänderung im Lichte. Die wichtigste zersetzende Lichtwirkung ist die Zersetzung des CO_2 der Luft an der Oberfläche der Pflanzen; der O kehrt in die Luft zurück, der C tritt in die Pflanzen als Hauptnahrungsmittel derselben ein.

Chemische Verbindungen durch das Licht sind: Cl und H im Dunkeln gemengt verbinden sich unter Explosion, wenn Sonnenlicht auf das Gemenge fällt. Chlorwasser wird allmälig zu Salzsäure, während stets Sauerstoffbläschen aufsteigen, indem sich das Cl mit dem H des Wassers verbindet und dadurch den O frei macht. Im Lichte entsteht das Chlorophyll (Blattgrün) der Pflanzen, vom Lichte wird das Solanin in den weißen Kartoffelkeimen zerstört u. s. w.

Während man häufig die ultravioletten Str. für die einzig chemisch wirksamen oder aktinischen Str. ausgibt, faßt Vogel (1878) die bis jetzt bekannten Thatsachen zu folgendem Ergebniß zusammen: Str. jeder Gattung können sowohl oxydirende als auch reducirende Wirkung haben; die auf einen Körper chemisch wirkenden Str. sind diejenigen, welche er zu absorbiren vermag; ist er leicht zersetzbar, so wird er von denselben zersetzt; ist er verbindungsfähig, so bewirken sie eine chemische Verbindung; ist er beides nicht, so bringt das Licht keine Wirkung hervor. Ueber die interessanteste chemische Wirkung des Lichtes, die Ernährung der Pflanzen, herrscht trotz des Fleißes der Forscher noch ein kaum durchdämmertes Dunkel, und die physikalische Frage, welche Str. hier die Wirkung vollbringen, wird in widersprechender Weise beantwortet, weil sie überhaupt erst nach Erkenntniß der Pflanzenernährung gelöst werden kann. Da nur die grünen Pflanzentheile O ausathmen,

erscheint das Glas im durchgehenden Lichte farblos und grün, im reflectirten Lichte himmelblau und blutroth.

In den meisten Fällen wird Fluorescenz durch die höheren Schwzn. hervorgerufen. Läßt man das Lichtbündel vor seinem Eintritte in die Aesculinlösung erst durch ein rothes Glas gehen, so entsteht der blaue Kegel nicht. Die Fluorescenzmappe besteht aus einer blauen und einer rothen Glasscheibe, die mappenartig zusammengeheftet sind, und zwischen denen ein Blatt mit Schriftzügen von Bariumplatincyanür liegt; fällt Licht durch das rothe Glas auf dieselben, so sind sie unsichtbar; geht aber das Licht durch das blaue Glas, so leuchten die Züge grün. Geht das auf Uranglas fallende Bündel vorher durch eine Lösung von Chlorkupfer, so bleibt der grüne Kegel aus. Läßt man auf eine Tafel von Uranglas oder einen Streifen Curcumapapier oder auf ein mit Chininlösung gefülltes längeres rechteckiges Glasgefäß ein durch ein Quarzprisma erzeugtes Sonnensp. fallen, so zeigt sich die Fluorescenzfarbe erst an der Stelle der höheren Spectralfarben und erstreckt sich oft weit bis in das Ultraviolette, wo sich dann deutlich ebenfalls die Fraunhofer'schen Linien L bis S erkennen lassen. Weil in allen diesen Fällen die Fluorescenzfarbe niedrigere Schwzn. als die erregenden Farben besitzt, so hielt Stokes die Fluorescenz überhaupt für eine Erniedrigung der Schwingungszahl, für eine Verminderung der Brechbarkeit. Nach Lommel bildet schon das Chlorophyll hiervon eine Ausnahme; seine blutrothe Fluorescenz wird zwar auch von allen höheren Spectralfarben erregt, am stärksten aber von der gleichen Spectralfarbe. Das Magdalaroth aber zeigt geradezu die entgegengesetzte Erscheinung; füllt man eine Lösung dieses Stoffes in ein rechteckiges Glasgefäß und läßt auf eine Oberfläche derselben ein Sonnensp. fallen, so entsteht die orangegelbe Fluorescenz schon im rothen Theile des Sp., wodurch hier eine Erhöhung der Schwz. unverkennbar ist. Da jedoch die Erhöhung der Schwz. nur ausnahmsweise vorkommt und bei den ziemlich häufigen Fluorescenzen dritter Art immer mit Erniedrigung verbunden ist, so darf man wohl von einer Stokes'schen Regel der Erniedrigung der Schwz. sprechen. Eine Erklärung der Fluorescenz liegt aber darin nicht, diese muß von der Absorption ausgehen.

Denn mit der Fluorescenz ist immer Absorption verbunden. Schon die rasche Abnahme der Farbe des Lichtkegels zeigt, daß durch die Fluorescenz die wirksamen Strahlen verbraucht werden. Deutlicher erhellt dies aus dem Spectralversuche: Die Spectralfarben, die keine Fluorescenz erregen, gehen ungeschwächt durch das rechteckige Glasgefäß, die wirksamen aber verschwinden. Vergleicht man das Absorptionssp. irgend einer Flüssigkeit mit dem fluorescirenden Sp. auf dem rechteckigen Gefäße, so wird die Entstehung der Fluorescenz aus den absorbirten Strahlen unverkennbar; wo der erste Schimmer von Fluorescenz auftaucht, beginnt auch die Absorption; jedem Maximum der Absorption entspricht auch ein Maximum der Fluorescenz, und wo im Absorptionssp. die dunkeln Stellen aufhören, endigt auch die Fluorescenz. Lommel legt daher seiner Fluorescenztheorie die Absorption des Lichtes zu Grunde, welche bekanntlich in dem Uebergange der Aetherschw. auf die Körpermol. beruht. Wie aber ein Ton nur auf einen gleichgestimmten Resonanzkörper übergeht, so können auch Aetherschw. nur auf Mol. übergehen, die auf dieselbe Schwz. abgestimmt sind, oder welche, da in festen und flüssigen Körpern die Mol. schon schwingen, dieselbe Schwz. aber mit so kleinen Amplituden vollziehen, daß dieselben keinen Lichteindruck machen können. Nach Lommels mathematischen Untersuchungen erleidet dieses Kirchhoff'sche Absorptionsgesetz hier aber die Ausnahme, daß die Lichtstr. nicht blos die gleichen Schwzn. der Mol., sondern auch die halb und doppelt so großen verstärken, falls dieselben oder darauf abgestimmte Mol. vorhanden sind, daß also auch die tieferen und höheren Octaven der absorbirten Farben in dem Körper entstehen. Den Uebergang auf gleiche Schwzn. nennt Lommel directe Absorption, den Uebergang auf die Octaven indirecte Absorption. Außerdem stellt derselbe die Hypothese auf, bei jeder Erregung würden nicht blos die gleichen Schwzn. und die Octaven verstärkt und erzeugt, sondern alle, die der Körper überhaupt vollbringen kann; als Analogie werden die tönenden Platten angeführt, welche ebenfalls bei jeder Erregung alle Haupt- und Nebentöne gleichzeitig ergeben. Es wurde schon öfter darauf hingewiesen, daß in festen und flüssigen Körpern die Mol. mit verschiedener Kraft in ihrer Lage verharren, also auch in verschiedene Schwzn. gerathen müssen, und zwar wegen ihres innigen Zusammenhanges gleichzeitig.

Die Fluorescenz erster Klasse findet sich bei Körpern mit anomaler Dispersion und Oberflächenfarben, deren Färbung sehr intensiv ist, wie Magdalaroth, Eosin, Fluorescein, Chlorophyll, Uranglas, die also sehr energisch absorbiren, im Absorptionssp. stark dunkle Streifen haben. Lommel beweist mathematisch, daß die selbstleuchtenden Schwzn., welche durch die absorbirte Welle entstehen, etwas tiefer liegen als diejenigen des Absorptionsmaximums, jedoch nur dann, wenn die Atome beim Schwingen einen Widerstand überwinden müssen, daß also die Fluorescenz nicht ganz Einklang oder Resonanz ist. Stellt AH (Fig. 217) die Länge des Sonnensp. zwischen den Fraunhofer'schen Linien A und H vor und abp den Absorptionsstreifen, so kann crd das Fluorescenzsp. sein. Nun ist aber die Fluorescenzfarbe in dieser Klasse überall dieselbe; so fluorescirt das Magdalaroth an allen

Fig. 218 stellt einen hor. Querschnitt des Auges vor, wodurch die drei Hautsysteme und die drei Feuchtigkeiten sichtbar werden. 1. Die feste Kapsel besteht in ihrem größeren hinteren Theile aus der undurchsichtigen, harten, weißen Sehnenhaut s (Sclerotica) und in dem kleineren vorderen Theile aus der durchsichtigen, knorpeligen, farblosen Hornhaut h (Cornea). Die Sehnenhaut ist der stärkste Theil der drei Hautsysteme, schützt die Haupttheile und wird durch ein äußerst dichtes und straffes Geflechte von leimgebenden Bindegewebsfasern gebildet; äußerer Durchmesser c^a 24^{mm}, Dicke c^a $1/2^{mm}$. Die ebenso dicke Hornhaut, von der Form eines stark gekrümmten Uhrglases, ist vorn in die Sehnenhaut eingesetzt und besteht aus 3 Schichten, dem äußeren aus Hornzellen gebildeten Epithelium (in der Fig. ausgezogen), der starken Knorpelschicht (weiß gelassen) und der Descemet'schen Haut, einer glasartigen dünnen Lamelle (gestrichelt). 2. Das System der Uvea (in der Fig. schwarz) zerfällt in den hinteren, die Innenwand der Sehnenhaut auskleidenden Theil adda, die Aderhaut oder Chorioidea, und in den vorderen, mehr ebenen, hinter der Hornhaut gelegenen, aber von dieser etwa um 4^{mm} abweichenden Theil irri, der Regenbogenhaut oder Iris; diese hat in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung, das Sehloch oder die Pupille rr. Die Aderhaut ist eine dünne, aus Blutgefäßen und strahligen Zellen gewebte Membran, welche nach innen mit dunkeln Pigmentkörperchen ganz bedeckt und daher schwarz ist. An ihrem vorderen, inneren Rande bildet sie 70—72 starke, häutige Falten, die Ciliarfortsätze cc, deren vordere Ausläufer in meridianaler Richtung gegen die Iris hingehen. An den vorderen, äußeren Rand der Aderhaut legt sich der Ciliarmuskel; wo dieser endigt und die Aderhaut an die Sehnenhaut festgewachsen ist, entspringt die Iris, eine bewegliche, veränderliche Blendung für die Linse, an deren Vorderfläche sie mit ihrem mittleren Theile anliegt. Sie enthält wie der Ciliarmuskel organische, d. i. dem Willen entzogene, nicht quer gestreifte Muskelfasern, welche man in zwei Muskeln zusammenfassen kann, den Ringmuskel und den Erweiterer der Pupille. 3. Die Netzhaut ist eine höchst dünne Ausbreitung von durchsichtiger Nervenmasse zwischen der Aderhaut und dem Glaskörper, in welcher sich die Fasern des Sehnerven verzweigen, der hinten etwas nach der Nase zu bei dd die Sehnenhaut und die Aderhaut durchdringt. Trotz ihrer außerordentlichen Dünnheit ($1/5$ bis $1/10^{mm}$) besteht die Netzhaut nach Henle doch aus 10 verschiedenen Schichten. Die innerste und oberste Schicht, die Membrana limitans hängt mit der Hülle des Glaskörpers, der Glashaut, zusammen; dann folgt eine aus den radialen Verzweigungen des Sehnerven bestehende Schicht, deren Fasern mit den Zipfeln der sternförmigen Zellen, aus denen die dritte Schicht besteht, zusammenhängen. Unter derselben lagern mehrere Körnerschichten, und die unterste oder äußerste Stelle an der Grenze der Aderhaut nimmt die wichtigste Schicht, die Stäbchenschicht, ein. Dieselbe besteht aus pallisadenförmig, senkrecht zur Oberfläche neben einander stehenden Stäbchen von $0{,}07^{mm}$ L. und $0{,}002^{mm}$ D. und aus Zapfen, halb cylindrisch, halb kegelförmig, von etwas größerer Länge und 0,003 bis $0{,}009^{mm}$ Dicke. Von dem nach innen gekehrten Ende jeden Zapfens und jedes Stäbchens gehen höchst feine Fäden, die Müller'schen Fasern, durch die mittleren Körnerschichten nach den Zipfeln der Nervenzellenschicht, wodurch dieselben mit den Fasern des Sehnerven in Verbindung stehen. Nach den Forschungen von Max Schultze enthält jedes Stäbchen und jeder Zapfen ein aus Nervensubstanz gebildetes Innenglied und ein aus zahlreichen durchsichtigen Plättchen bestehendes Außenglied; in der Stäbchenschicht geht die Lichtperception vor sich. Unter der Eintrittsstelle des Sehnerven sind natürlich keine Stäbchen und Zapfen; daher ist diese Stelle keiner Lichtempfindung fähig; sie heißt blinder Fleck oder Mariotte'scher Fleck. Von dem Vorhandensein desselben überzeuge man sich an Fig. 219: Man schließe das linke Auge, fixire mit dem rechten das weiße Kreuzchen und bringe das Buch in eine Entf. von 3^{dm}, so wird der weiße Kreis verschwinden. Eine andere Netzhautstelle von dem blinden Fleck nach den Schläfen zu hat im Gegentheile die schärfste Lichtempfindung; sie heißt wegen ihrer gelben Farbe der gelbe Fleck, enthält keine Nervenfasern, keine Gefäße und in der Stäbchenschicht nur Zapfen.

Fig. 218.

mehr; Gelb und Grün verlöschen also auch die Phosphorescenz. Wurden die 4 Kugeln in ähnlicher Weise benutzt, so wurde das Leuchten hinter Wasser und Alaun verstärkt, hinter Jod und Aesculin aber ausgelöscht, womit das Verlöschen durch ultrarothe Str. abermals dargethan war, da Jod nur diese durchläßt. Da das Aesculin stark fluorescirt, aber nicht phosphorescirt, ja das Phosphoresciren und seine Str. verlöscht, so könnte man hierin einen großen Unterschied zwischen Fluorescenz und Phosphorescenz vermuthen; es ist jedoch das gerade Gegentheil der Fall. In dem Lichtkegel, der in Chininlösung eindringt, ist nur der stumpfe Anfang blau; in dem, der in das grünliche Saphiringlas dringt, nur die Basis roth u. s. w.; die Fluorescenz findet nur in der äußersten Oberfläche statt; die Fluorescenz wird also ebenfalls und zwar schon durch die dünnste Schicht des fluorescirenden Körpers aufgehoben, ist also hierin der Phosphorescenz analog. Demnach spricht diese Thatsache für die jetzt viel verbreitete Ansicht, daß die Erscheinungen nur in der Zeit verschieden seien, weßhalb manche Autoren die beiden Bezeichnungen oft für einander gebrauchen. Jedoch zeigten Dreher und Gädicke, daß, wie es nach ihrer Theorie (281. 2) sein muß, die Phosphore während der Insolation nicht leuchten.

331 **Die anomale Dispersion** (Kundt 1871). Körper mit Oberflächenfarben haben die Eigenschaft, niedrige Farben wie Roth, Orange, Gelb, statt schwächer, stärker zu brechen als die höheren Farben z. B. Blau und Violett; das Spectrum solcher Körper beginnt gewöhnlich mit den höheren Farben Blau und Violett, zeigt dann eine dunkle Lücke, und enthält am stärker gebrochenen Ende die niedrigen Farben Roth bis Gelb. Diese Eigenschaft der Körper mit Oberflächenfarben, niedrige Schwingungszahlen gegen die Regel stärker zu brechen als höhere, nennt man die anomale Dispersion. Körper mit Oberflächenfarben sind solche, die im reflectirten Lichte mit anderer Farbe erscheinen als im durchgelassenen, bei denen also die Körperfarbe nicht erst nach einer Absorption in den obersten Molekülschichten durch Reflexion gebildet wird, da sonst im reflectirten Lichte dieselbe Farbe wie im durchgelassenen erscheinen müßte, sondern welche ihre Farbe durch Reflexion an der äußersten Grenzfläche erhalten, wodurch der Name Oberflächenfarbe erklärlich ist. Diese starke Reflexion ist nur dadurch erklärlich, daß diese Körper für jene Farben totale Reflexion, also sehr große Brechungsexponenten besitzen, und dies ist nur dadurch möglich, daß die Geschwindigkeit dieser Farben in dem Körper sehr gering ist, daß also das Licht sich so gut wie nicht durch diese Körper fortpflanzt, was wieder nur dann erklärlich ist, wenn die Körper für jene Farben eine sehr starke Absorption besitzen. Kundt hat nun in der That gezeigt, daß die Körper mit Oberflächenfarben gerade diese Farben total absorbiren, und daß der Brechungsexponent derselben unendlich groß ist; an dieser Vergrößerung des Brechungsexponenten haben aber nicht nur die absorbirten, sondern auch die niedrigeren Farben Antheil, wodurch sich ihre stärkere Brechung erklärt.

Leroux hatte schon 1862 gefunden, daß Joddampf die rothen Str. stärker bricht als die blauen; außerdem hatte schon Cauchys Dispersionstheorie in Verbindung mit Jamins Versuchen über die Metallfarben ergeben, daß auch die Metalle die umgekehrte Dispersion der durchsichtigen Körper besitzen. Endlich beobachtete Christiansen (1870), daß eine alkoholische Lösung von Fuchsin, in ein sehr spitzes Hohlprisma gebracht, ein anomales Sp. erzeugt, das mit Blau und Violett beginnt, in welchem Grün fehlt, und das mit Roth und Gelb endigt; er bestimmte auch die B.-E. einer concentrirten Lösung und fand dieselben für Roth 1,45, Gelb 1,52, Blau 1,34, Violett 1,37. Kundt kam sogleich, wohl durch die obige Schlußweise geleitet, auf den Gedanken, die anomale Dispersion in allen Körpern mit Oberflächenfarben zu vermuthen, und fand diese Vermuthung durch Versuche überall bestätigt.

Oberflächenfarben sind auch im gewöhnlichen Leben, z. B. am festen Indigo bekannt, der aus einer rauhen Oberfläche also aus seinem Inneren die bekannte blaue Farbe schickt, die er auch in Lösung zeigt, an einer glatt geriebenen Oberfläche aber ein complementäres Orangeroth zeigt, das eben als Oberflächenfarbe metallisch, wie kupferroth aussieht. Da die Oberflächenfarbe nach obigem Schlusse auch absorbirt wird, so kann sie in dem durchgegangenen Lichte nicht mehr enthalten sein; daher ist die Oberflächenfarbe wie beim Indigo der inneren oder durchgelassenen complementär; läßt man auf einer Glasplatte eine Lösung des Fuchsins rasch verdunsten, so erscheint dieselbe im reflectirten Lichte grün, im durchgelassenen roth. Auch alle Anilinfarben, sowie Kaliumpermanganat haben den falschen Schiller der Oberflächenfarben und bewirken alle nach Kundt eine anomale Dispersion. Da diese

Körper nur in den dünnsten Schichten durchsichtig sind, so kann man ihr Sp. nur an der Kante eines sehr spitzwinkeligen Prismas untersuchen, was indessen eine neue Beobachtungsmethode von Soret nicht nöthig macht.

In dem anomalen Sp., das nach diesen Methoden erhalten wird, fehlt immer die Oberflächenfarbe, wodurch nachgewiesen ist, daß sie absorbirt wird, daß also ihre Geschw. in dem Körper sehr gering ist. Hierdurch wird der B.-E. c / c' sehr groß, für c' gleich Null sogar unendlich. Wirklich zeigen die Untersuchungen Kundts, daß die B.-E. der niederen Farben nach der absorbirten Farbe zu sehr rasch wachsen, daß ihre Dispersionscurve gegen die Lücke zu fast assymptotisch ansteigt. Sellmeier hatte eigentlich die ganze Erscheinung schon 1866 theoretisch vorausgesagt, indem er von dem Gedanken ausging, daß die Absorption ein Uebergang auf die Körpermol. sei und daß mit derselben eine unendliche Erhöhung des B.-E. für die absorbirten Farben verbunden sein müsse, woraus er schloß, daß auch die B.-E. der niederen Farben erhöht und der höheren erniedrigt würden.

Kundt beobachtete (1880), daß auch glühender Natriumdampf für diejenigen Str. anomale Dispersion hat, die in der Nachbarschaft der D-Linie liegen, also in der Nachbarschaft der Strahlen, die er emittirt oder für die er auswählende Absorption besitzt; vor dieser Stelle steigt der B.-E. rasch und hinter ihr ist er viel kleiner und nimmt dann wieder rasch zu. Nach Kundt muß folglich Natriumdampf jene gelben Str. auch stark reflectiren; hieraus würde folgen, daß z. B. ein Komet ein Liniensp., ohne selbstleuchtend zu sein, haben könnte, wenn er nämlich für einzelne Partieen des auftreffenden Sonnenlichtes auswählende Absorption besäße und daher diese Partieen vorzugsweise reflectirte.

332 **Chemische oder aktinische Wirkung des Lichtes.** Wie bei der gewöhnlichen Absorption des Lichtes eine Verwandlung von Licht in Wärme stattfindet, so ist auch eine Verwandlung von Licht in Arbeit denkbar, d. h. die Aetherschwingungen können, indem sie auf Körperatome übergehen, diese Atome weiter von einander entfernen und dadurch eine chemische Zersetzung bewerkstelligen. Indeß ist es auch möglich, daß durch die Aetherschwingungen die Körperatome ebenfalls in Schwingungen versetzt werden, und daß hierdurch insbesondere die fortschreitenden Gasatome noch schwingende Bewegungen annehmen; dies kann die Folge haben, daß in Gemengen verschiedener Gase die verschiedenen Atome einander genähert werden und sich dann einander festhalten. So können durch Licht auch chemische Verbindungen befördert werden. Unter welchen Umständen diese Erscheinungen stattfinden, hängt von der materiellen Verschiedenheit ab, deren Wesen uns unbekannt ist.

Chemische Zersetzungen durch das Licht sind: das weiße Chlorsilber wird durch das Licht geschwärzt, indem das Cl entweicht und das Ag in kleinsten Theilchen zurückbleibt; wenn das Licht nur kurze Zeit auf das Ag Cl eingewirkt hat, so wird dasselbe von reducirenden Stoffen leichter zersetzt als vom Lichte unberührtes Silbersalz; ähnlich verhält sich Jodsilber; hierauf beruht die Photographie (358). Salpetersäure wird im Lichte gelb, nach längerer Zeit roth, weil sie sich in NO_2 und O zersetzt. Organische Farbstoffe zersetzen sich unter dem Einflusse des Lichtes, indem ihr C und ihr H sich mit dem ozonisirten O der Atmosphäre verbinden; hierauf beruht das Bleichen, sowie manche andere Farbenänderung im Lichte. Die wichtigste zersetzende Lichtwirkung ist die Zersetzung des CO_2 der Luft an der Oberfläche der Pflanzen; der O kehrt in die Luft zurück, der C tritt in die Pflanzen als Hauptnahrungsmittel derselben ein.

Chemische Verbindungen durch das Licht sind: Cl und H im Dunkeln gemengt verbinden sich unter Explosion, wenn Sonnenlicht auf das Gemenge fällt. Chlorwasser wird allmälig zu Salzsäure, während stets Sauerstoffbläschen aufsteigen, indem sich das Cl mit dem H des Wassers verbindet und dadurch den O frei macht. Im Lichte entsteht das Chlorophyll (Blattgrün) der Pflanzen, vom Lichte wird das Solanin in den weißen Kartoffelkeimen zerstört u. s. w.

Während man häufig die ultravioletten Str. für die einzig chemisch wirksamen oder aktinischen Str. ausgibt, faßt Vogel (1878) die bis jetzt bekannten Thatsachen zu folgendem Ergebniß zusammen: Str. jeder Gattung können sowohl oxydirende als auch reducirende Wirkung haben; die auf einen Körper chemisch wirkenden Str. sind diejenigen, welche er zu absorbiren vermag; ist er leicht zersetzbar, so wird er von denselben zersetzt; ist er verbindungsfähig, so bewirken sie eine chemische Verbindung; ist er beides nicht, so bringt das Licht keine Wirkung hervor. Ueber die interessanteste chemische Wirkung des Lichtes, die Ernährung der Pflanzen, herrscht trotz des Fleißes der Forscher noch ein kaum durchdämmertes Dunkel, und die physikalische Frage, welche Str. hier die Wirkung vollbringen, wird in widersprechender Weise beantwortet, weil sie überhaupt erst nach Erkenntniß der Pflanzenernährung gelöst werden kann. Da nur die grünen Pflanzentheile O ausathmen,

so hielt man das Chlorophyll für das Agens bei der Zersetzung von CO_2 der Luft durch die Pflanzen; und da das Chlorophyll hauptsächlich Roth absorbirt, so hielt man die rothen Str. für die wirksamsten. J. W. Draper hatte aber schon vor mehr als 30 Jahren das Maximum in das Gelb verlegt, und Pfeffer schloß aus seinen Versuchen (1870—73), daß die Assimilationswerthe der einzelnen Spectralfarben für die Pflanzen in einem wesentlich gleichen Verhältnisse zueinander stehen wie die Helligkeitsempfindungen des Auges, daß also das Maximum im Gelb liege. Hält man dagegen die Versuche von William Siemens (1880), der nächtlich mit elektrischem Lichte beleuchtete Pflanzen ganz besonders wachsen sah, so sollte man glauben, daß die brechbareren Farben die beste Wirkung haben. Morgen (1877) schließt aus seinen Versuchen, daß die Trockengewichtszunahme der Pflanzen im farblosen Theile des Sp. am stärksten, im Gelb fast gleich stark, im blauen Theile aber viel geringer sei, wogegen Böhm (1878) nach Versuchen an Feuerbohnen behauptet, die Stärkemehlbildung im Chloropyll, welche ja die Trockengewichtszunahme ausmacht, könne auch unabhängig vom Lichte stattfinden. In diesem Irrsale scheint durch Pringsheims Forschungen (1879) ein Leitfaden aufzutauchen; derselbe erklärt, nach seinen in vollkommen neuer Weise angestellten Versuchen sei das Chlorophyll gar nicht der Träger der Assimilation,. sondern es schütze nur durch seine starke Absorption der photochemisch wirksamsten Str. den Zellinhalt vor zu starker Oxydation, womit die Sauerstoffausathmung zusammenhänge; der Träger sei vielmehr das Hypochlorin, ein durch Kohlensäure und Wasser entstehender Kohlenwasserstoff, der in feinsten Körnchen durch den ganzen Zellinhalt verbreitet, gegen das Licht am allerempfindlichsten sei und durch O und Licht in Stärke und andere Kohlehydrate übergehe.

7. Das Auge und die optischen Instrumente.

Physiologische und praktische Optik.

Der Bau des Auges. Bei den niedersten Thieren, welche meist keine andere Lichtempfindung als Hell und Dunkel haben, besteht das Auge nur aus einem Augenpunkte, dem peripherischen Ende eines lichtempfindenden Nerven, das dem Lichte zugänglich unter durchsichtigen Decken liegt. Damit durch ein Auge Gestalten unterschieden werden können, muß das Licht, das von gesonderten leuchtenden Punkten ausgeht, auch gesondert, d. h. mittels verschiedener Nervenfasern wahrgenommen werden. Zu diesem Zwecke führt bei vielen wirbellosen Thieren zu jeder lichtempfindenden Nervenfaser ein kegelförmiger, durchsichtiger Gallertkörper, welcher durch eine undurchsichtige Scheidewand, die Pigmentscheide, von den anderen ganz gleichen Körpern, deren Zahl bis zu 25000 steigt, getrennt ist und daher auch nur die Strahlen eines Punktes und zwar desjenigen, der in seiner Richtung liegt, auf das zugehörige Nervenende führt. Da die Pigmentscheiden sich bis an die äußere Grundfläche dieser Gallertkegel, der sogenannten Glaskörper, erstrecken, so erscheinen solche Augen von außen in überaus kleine Felder getheilt, facettirt; sie heißen daher Facetten-Augen oder auch zusammengesetzte Augen. Bei einigen wirbellosen Thieren dagegen, sowie bei den Wirbelthieren und bei den Menschen geschieht die Scheidung des Lichtes durch Brechung an gekrümmten Flächen durchsichtiger Medien; solche Augen heißen einfache Augen. 333

Das menschliche Auge liegt in Form einer Kugel, Augapfel genannt, in lockeres Fettzellgewebe eingebettet, in der knöchernen Augenhöhle, welche die Form eines Kegels hat; der Augapfel wird von sechs Muskeln bewegt und durch die Augenbrauen, Augenlider und Augenwimpern geschützt. Die hintere Haut der Augenlider, die Bindehaut (Conjunctiva) ist locker an den Augapfel geheftet, außerordentlich empfindlich gegen die leiseste Berührung des kleinsten, fremden Körperchens und sucht ein solches durch unwillkürliche Bewegungen der Lider, das Blinzeln, zu entfernen, mit Beihilfe der Feuchtigkeiten, welche von ihren eigenen Schleimdrüsen, den Fett aussondernden Meibom'schen Drüsen und den Thränendrüsen bereitet werden, und welche die Vorderfläche des Augapfels stets rein und glänzend erhalten.

Die Hülle des Augapfels wird von drei Hautsystemen gebildet, der festen Kapsel, der Uvea oder Traubenhaut und der Retina oder Netzhaut. Der Inhalt besteht aus drei Feuchtigkeiten, der wässerigen Feuchtigkeit, der Krystalllinse und dem Glaskörper.

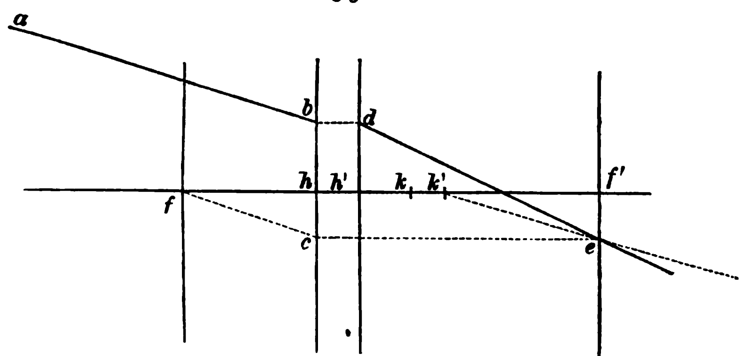
Zwecke müßte der Beobachter im Stande sein, die von einer solchen Einzelheit ausgehenden Str. auf dem gelben Fleck seiner eigenen Netzhaut zu vereinigen, was nur dann leicht gelingt, wenn überhaupt schon ein Netzhautbild vorhanden ist, wenn sich also die Strahlen schon an einer anderen Stelle der Netzhaut vereinigen. Dies ist aber nicht der Fall, weil die aus einem Auge kommenden Strahlen durch die Augenmedien eine bestimmte Brechung erleiden, also auch einen bestimmten Vereinigungspunkt haben. Doch gelingt es nach fleißiger Uebung einem normalen Auge mittels einer besonderen, noch zu betrachtenden Fähigkeit des Auges, die man Accommodation nennt, die fremden Netzhautstr. zu vereinigen. Ein ungeübter Beobachter oder ein solcher mit nicht normalen Augen muß sich durch Linsen unterstützen, wozu sowohl concave Linsen zur Erzeugung eines vergrößerten virtuellen Bildes, wie auch convexe Linsen zur Erzeugung eines reellen Bildes benutzt werden können. Der Augenspiegel von Helmholtz ist in Fig. 220 im Durchschnitt abgebildet. Das Licht der Flamme L fällt auf die Glasplatten a und wird von diesen in das Auge X reflectirt. Der Beobachter setzt das Instrument mit dem Becken B vor sein Auge, wodurch er sich gegen das Blenden durch die Flamme L schützt; er sieht durch die Concavlinsen c und c', sowie durch die Platten a in das Auge X. In den zwei kreisförmigen Scheiben bb und dd, die um die Achse ff drehbar sind, sitzen mehrere Linsen, die nach Bedürfniß vor das beobachtende Auge gedreht oder auch herausgenommen werden können. — Der Augenspiegel ist nicht blos von Bedeutung für die Wahrnehmung der Sehvorgänge, sondern hat auch zuerst die richtige Erkenntniß vieler Krankheiten und Abnormitäten der Augen möglich gemacht.

Auf dem Satze, daß Str., welche durch eine brechende Kugel gegangen sind und an der Hinterwand derselben ein Bild erzeugen, auf demselben Wege wieder zurückkehren, beruht der schon von Winterfeld (1795) und von Lommel (1874) neuerdings entdeckte Heiligenschein, den man auf einer thaubedeckten Wiese um den Schatten des eigenen Kopfes wahrnimmt. Derselbe ist jedoch nur bei tiefem Sonnenstande sichtbar. Jeder einzelne Thautropfen erzeugt auf seinem Grashalme ein Sonnenbild, dessen Str. ebenso rückwärts gehen und den ganzen Tropfen erleuchten, natürlich nur für ein Auge, das sich in der Richtung der Sonnenstr. befindet. Indessen ist dieser Nimbus auch auf einer trockenen Wiese, auf einem Getraide- oder Stoppelfeld, auf geackertem Boden, überhaupt auf jeder rauhen Fläche, aber viel schwächer, zu erblicken, rührt aber dann einfach davon her, daß die rauhen Theile um den Kopfschatten herum uns ihre beleuchteten Hälften, wie Vollmonde, zuwenden, während entferntere Theile sich wie Mondviertel oder Neumonde verhalten (Brockengespenst; Aureole um den Schatten eines Luftballons auf einer Wolke).

335 **Das schematische Auge** (Listing 1845). Um für jeden äußeren Punkt die Lage des Netzhautbildes leicht finden, und um das Auge überhaupt einer mathematisch-physikalischen Betrachtung unterziehen zu können, muß man von dem wirklichen Auge abstrahiren und sich mit einer Annäherung an dasselbe begnügen, die man schematisches Auge nennt. Denn in dem wirklichen Auge liegen 4 brechende Medien: die Hornhaut, die wässerige Feuchtigkeit, die Linse, der Glaskörper, hinter einander, deren Grenzflächen durchaus nicht kugelförmig sind, und deren Achsen nicht in eine Gerade fallen; außerdem ist die Linse ein aus unzähligen Lamellen zusammengesetzter Körper. Ein so verwickelt gebautes System entzieht sich der mathematischen Behandlung. Glücklicherweise ist aber die Abweichung von der Kugelgestalt und die Richtungsverschiedenheit der Achsen gering; außerdem läßt sich beweisen, daß für jedes centrirte System brechender Flächen ein System von nur 2 solcher Flächen gesetzt werden kann, welches ebenso große und ebenso gelegene Bilder entwirft wie jenes. Man findet daher annähernd richtige Gesetze für das Auge, wenn man die Scheiteltheile der brechenden Flächen für Kugelflächen nimmt, deren Mittelpunkte sämmtlich auf einer Geraden liegen, die von dem Scheitel der Hornhaut nach dem gelben Fleck hingeht und die man Augenachse nennt, weil sie auch die optische Achse der Krystalllinse bildet. Für ein System von 2 brechenden Flächen, also in 3 verschiedenen Medien sind für die Ableitung der Bilder und Gesetze (nach Gauß „Dioptrische Untersuchungen" 1843) 2 Brennpunkte und der optische Mittelpunkt nicht ausreichend; es sind vielmehr 3 Paar Cardinalpunkte und durch dieselben senkrecht zur Augenachse gelegte Cardinalebenen erforderlich: 2 Brennpunkte, 2 Hauptpunkte und 2 Knotenpunkte, ebenso 2 Brennebenen, 2 Hauptebenen und 2 Knotenebenen. Der erste Brennpunkt ist dadurch bestimmt, daß jeder vor der Brechung durch ihn gehende Str. nach der Brechung parallel zur Achse wird, während im zweiten Brennpunkte sich alle Str. vereinigen, die vor der Brechung parallel zur Achse waren. Die Hauptebenen sind dadurch bestimmt, daß das Bild eines in der ersten gelegenen Gegenstandes in der zweiten liegt und mit dem Gegenstande in Lage und Größe übereinstimmt; die Hauptpunkte sind die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der Achse; der eine ist das Bild des anderen, d. h. die Str., welche im ersten Mittel durch den ersten Hauptpunkt gehen, gehen nach der letzten Brechung durch den zweiten. Auch der zweite Knotenpunkt ist das Bild des ersten; sie sind dadurch bestimmt, daß ein Str., der im ersten Medium durch den ersten Knotenpunkt gerichtet ist, nach der Brechung in paralleler Richtung durch den zweiten Knotenpunkt geht. Nimmt

man mit Listing den B.-E. der Luft = 1, der wässerigen und der Glasfeuchtigkeit = $^{103}/_{77}$, der Linse = $^{16}/_{11}$, die Krümmungsradien der Hornhaut = 8mm, der vorderen Linsenfläche = 10mm, der hinteren = 6mm, den Abstand der vorderen Hornhaut- und der vorderen Linsenfläche = 4mm, die Dicke der Linse = 4mm, Werthe, welche wohl auch Durchschnittsmaße der wirklichen Augen vorstellen, so ergeben sich für das schematische, ins Unendliche gerichtete Auge folgende Lagen der Cardinalpunkte: Abstand des ersten Brennpunktes von der Hornhaut = 12,8mm, des zweiten Brennpunktes von der Hinterfläche der Linse = 14,6mm; Abstand des ersten Hauptpunktes von der Vorderfläche der Hornhaut = 2,17mm, des zweiten = 2,57mm; Abstand beider Hauptpunkte 0,4mm; Abstand des ersten Knotenpunktes von der hinteren Linsenfläche = 0,76mm, des zweiten = 0,36mm; Abstand beider Knotenpunkte = 0,4mm. In Fig. 221 sind diese Punkte der Reihe nach mit f, f', h, h', k, k' bezeichnet.

Fig. 221.



Mittels dieser Punkte und der dazu gehörigen Ebenen läßt sich die Lage und Größe eines Netzhautbildes sowohl berechnen als auch construiren. Den Gang eines Str. ab (Fig. 221) findet man auf folgende Weise: Man zieht von dem Schnitte b des Str. mit der ersten Hauptebene eine Parallele zur Achse bis zur zweiten Hauptebene in d; ebenso durch f eine Parallele zum Str. bis zur ersten Hauptebene in c und von hier parallel zur Achse bis zur zweiten Brennebene in e, dann ist de der gebrochene Str. Einfacher noch erhält man e durch die Knoten, indem man durch den zweiten Knoten k' eine Parallele k'e zum Str. bis zur zweiten Brennebene zieht. Da sowohl die beiden Hauptpunkte, wie auch die beiden Knotenpunkte einander sehr nahe liegen, so kann man jedes Paar in einen Punkt zusammenziehen und außerdem den 3 Medien ein einziges substituiren, dessen B.-E. = $^{103}/_{77}$ und dessen vordere Oberfläche einen Radius von 5,1248mm hat. Dieses Auge heißt Listings reducirtes Auge; in demselben findet man das Netzhautbild eines Lichtpunktes, indem man einfach von diesem durch den Knoten eine Gerade bis zur Netzhaut zieht, welche man die Richtungslinie des Sehens nennt; der gedachte Knoten ist also der Kreuzpunkt der Richtungslinien; er liegt 0,4764mm vor der Hinterfläche der Linse. Benutzt man das schematische Auge, so muß man von dem Lichtpunkte eine Gerade nach dem ersten Knoten ziehen und zu dieser durch den zweiten Knoten eine Parallele. Diese zwei Linien geben den Weg des Lichtstrahles, des Richtungsstrahles, an, aber nur soweit, als die erste außerhalb des Auges und die letzte in dem Glaskörper liegt. Den Richtungsstrahl, der die Stelle des deutlichen Sehens, die Netzhautgrube, trifft, nennt man die Gesichtslinie, auch wohl Sehachse; dieselbe fällt nicht mit der Augenachse zusammen. Der Winkel, den die Richtungslinien oder Richtungsstrahlen der zwei äußersten Grenzpunkte eines Gegenstandes mit einander bilden, wird der **Gesichtswinkel** genannt. Aus der Größe und Entf. eines Gegenstandes kann man seinen Gesichtswinkel berechnen und aus diesem und dem Abstande des Kreuzungspunktes der Richtungsstrahlen die Größe des Netzhautbildes. So entspricht einem Haar von $^{1}/_{60}$''' Dicke in einer Entf. von 28'' gesehen ein Netzhautbild von 0,0 000 021'' Durchmesser und ein Gesichtswinkel von ca 1 Sec.

Nicht alle Gegenstände, die Lichtstr. ins Auge senden, erzeugen ein Bild auf der Netzhaut; es besteht vielmehr hier ebenso wie bei der einfachen Linse ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen der Gegenstandsweite, den Abständen der Cardinalpunkte und der Bildweite, so daß zu einer bestimmten Bildweite eine ganz bestimmte Gegenstandsweite gehört. Da nun die Entf. der Netzhaut von der vorderen Augenfläche, also auch die Bildweite für jedes Auge eine bestimmte Größe hat, so könnten auch nur von Gegenständen in ganz bestimmter Entf. scharfe Netzhautbilder entstehen, wenn nicht das Auge die Fähigkeit hätte,

sich innerhalb gewisser Grenzen der Entfernung der Gegenstände anzupassen, eine Fähigkeit, die man das Accommodations- oder Adaptionsvermögen des Auges nennt.

336 **Die Accommodation** (Keppler 1611, Helmholtz 1855). Unter Accommodation versteht man die Fähigkeit des Auges, von Gegenständen in den verschiedensten Entfernungen innerhalb gewisser Grenzen deutliche Netzhautbilder hervorzurufen und dieselben dadurch deutlich sehen zu können. Doch ist hiermit nicht ausgesprochen, daß das Auge gleichzeitig verschieden entfernte Gegenstände deutlich zu sehen vermöge; vielmehr findet das directe Gegentheil statt.

Hält man hinter einen Schleier ein Buch, so erscheint das Gewebe verwaschen, wenn man die Buchstaben fixirt und umgekehrt; hält man senkrecht vor eine Fensterrippe eine Nadel, so erscheint beim genauen Betrachten des einen Gegenstandes der andere nur als unbestimmter Streifen. Sehr lehrreich ist Scheiners Versuch (1619): Man sehe mit einem Auge durch zwei sehr nahe beisammen stehende Oeffnungen in einem Kartenblatte nach einer Nadel, die man senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Oeffnungen vor den hellen Hintergrund eines Fensters in 25cm Entf. vom Auge hält; fixirt man die Nadel selbst, so erscheint sie einfach; fixirt man dagegen einen näheren oder ferneren Punkt, so erscheint sie doppelt, aber undeutlich und verwaschen. Schließt man nun beim Fixiren eines näheren Punktes das linke Loch, so verschwindet das linke Bild und umgekehrt; beim Fixiren eines ferneren Punktes verschwindet mit dem Schließen des linken Loches das rechte Bild und umgekehrt. Dieser Versuch zeigt deutlich, daß beim Fixiren der Nadel die durch beide Löcher kommenden Str. sich auf der Netzhaut vereinigen, daß dagegen beim Fixiren eines näheren oder ferneren Punktes dies nicht stattfindet, und daß daher das Strahlenbündel jeder Oeffnung ein Bild erzeugt, das durch seine Undeutlichkeit eine unvollständige Vereinigung der Str. seines Bündels anzeigt, wie eine solche auch aus den zwei ersten der angeführten Versuche beim Nichtfixiren hervorgeht. Weil beim Fixiren eines näheren Punktes mit dem Verdecken des linken Loches auch das linke Nadelbild verschwindet, d. i. dasjenige, welches (wegen der umgekehrten Lage der Netzhautbilder) von dem rechten Netzhautbilde herrührt, so ergibt sich weiter, daß in diesem Falle die Str. sich schon gekreuzt haben, ehe sie auf die Netzhaut kamen, daß ihr Vereinigungspunkt also vor der Netzhaut liegt; und weil beim Fixiren eines ferneren Punktes mit dem Schließen des linken Loches das rechte Nadelbild verschwindet, d. i. dasjenige, welches von dem linken Netzhautbilde herrührt, so folgt, daß in diesem Falle die Str. der Nadel vor ihrer Vereinigung auf die Netzhaut fallen, daß also ihr Vereinigungspunkt hinter der Netzhaut liegt. Nehmen wir alle Versuche zusammen, so ist deutlich, daß die Str. eines nicht fixirten Punktes sich nicht auf, sondern vor oder hinter der Netzhaut vereinigen.

Nicht fixirte Gegenstände erscheinen hiernach undeutlich, weil das Netzhautbild von jedem Punkte derselben nicht ein Punkt, sondern wegen der Kreisform der Pupille ein Kreis, ein sogenannter Zerstreuungskreis ist, der davon herrührt, daß die Spitze des gebrochenen Strahlenkegels nicht auf, sondern vor oder hinter der Netzhaut liegt; und zwar vereinigen sich die Strahlen eines entfernteren Punktes, da dessen Zerstreuungskreis hinter der Kreuzung liegt, vor der Netzhaut; dagegen die Strahlen eines näheren, als des fixirten, Punktes vereinigen sich, da ihr Zerstreuungskreis vor der Kreuzung der Strahlen entsteht, erst hinter der Netzhaut. Die Accommodation muß demnach darin bestehen, daß das Auge solche Veränderungen mit sich vornimmt, welche die Zerstreuungskreise in Bildpunkte verwandeln.

Aeußerlich nimmt man bei der Accommodation folgende Veränderungen am Auge wahr: Accommodirt sich das Auge für die Nähe, so verengert sich die Pupille, der Pupillarrand und die vordere Linsenfläche verschieben sich etwas nach vorn, und die vordere Linsenfläche nimmt eine stärkere Wölbung an. Helmholtz hat die letztere und wesentliche Veränderung daran erkannt, daß von den drei Sanson'schen Bildchen, die von einem hellen Lichte im Auge sichtbar sind, und welche von der Hornhaut, der Vorder- und Hinterfläche der Linse herrühren, das zweite beim Sehen in die Nähe sich verkleinert und nähert, was nur durch eine stärkere Wölbung der spiegelnden Fläche bewirkt werden kann. Demnach beruht die Accommodation darin, daß für nähere oder fernere Gegenstände die Linse sich stärker oder schwächer wölbt, wodurch die Str. mehr oder weniger gebrochen und dadurch auf der Netzhaut vereinigt werden. Wodurch diese Veränderungen stattfinden, ist noch nicht vollständig klar. Nach Cramer (1853) zieht sich beim Sehen in die Nähe die Iris zusammen und übt dadurch, vereinigt mit dem Ciliarmuskel einen Druck auf den Rand der Linse aus,

wodurch der Rand nach hinten gebogen wird. Helmholtz (1855) hält diese Erklärung für unzureichend, weil hierdurch die Hinterfläche der Linse sich schwächer wölben müsse, während bei derselben doch ebenfalls eine schwache Verstärkung wahrnehmbar sei, da das dritte umgekehrte Sanson'sche Bildchen eine entsprechende Veränderung erfahre. Er nimmt daher an, daß die Linse im ruhenden, fernsehenden Zustande durch die an ihren Rand befestigte Zonula gedehnt werde; beim Sehen in die Nähe ziehe sich der Ciliarmuskel zusammen, biege dadurch die nach hinten ziehenden Falten der Zonula mehr nach vorn zum Linsenrande hin und vermindere so die Spannung der Zonula. Wenn aber der Zug der Zonula rings um den Rand der Linse herum nachlasse, müsse dieselbe vermöge ihrer schaligen Structur durch ihre eigene Elasticität sich stärker nach beiden Seiten wölben; durch den von Cramer erkannten Irisdruck würde die vordere Wölbung verstärkt, die hintere geschwächt. Dies ist der Mechanismus der Accommodation.

Das normale Auge ist im Ruhezustande auf Unendlich gestellt, d. h. parallele Strahlen vereinigen sich auf der Netzhaut; es vereinigt aber auch auf der Netzhaut vermöge der Accommodation die Strahlen aller Lichtpunkte von unendlicher Entfernung bis zu 10—15^{cm} herab; die größte Entfernung, auf welche ein Auge adaptiren kann, nennt man **Fernpunkt** oder Ruhepunkt, die kleinste Entfernung heißt **Nahpunkt**, die Strecke zwischen beiden Sehweite oder Accommodationsbreite. Donders nennt die Augen, welche ihren Fernpunkt im Unendlichen, ihren Nahpunkt bei 10—15^{cm} haben, **emmetropische Augen** (ἔμμετρος, richtig). Die Entfernung, in welcher die Augen kleine Gegenstände deutlich unterscheiden, z. B. kleinen Druck bei mittlerer Tageshelle leicht lesen können, heißt die **deutliche Sehweite**; sie beträgt bei emmetropischen Augen im Mittel 25^{cm}. Die kurz-, weit- und übersichtigen Augen haben andere Accommodationsgrößen; so liegt für kurzsichtige Augen der Nahepunkt näher, schon bei 5—10^{cm}, der Fernpunkt bei 15—190^{cm}; für weitsichtige Augen ist der Nahepunkt weit entfernt, mindestens 30^{cm}, und der Fernpunkt liegt hinter dem Auge, z. B. bei — 30^{cm}, weil diese Augen nicht bloß parallele, sondern auch convergente Strahlen auf der Netzhaut vereinigen. Bei diesen abnormen oder ammetropischen Augen ist die Sehweite beschränkt; so fällt bei der hochgradigen Kurzsichtigkeit Fern- und Nahpunkt zusammen auf 5^{cm}. Die deutliche Sehweite ist bei den Kurzsichtigen kleiner, bei den Weitsichtigen größer als 25^{cm}; daher bietet die Bestimmung der deutlichen Sehweite das einfachste Mittel, die Sehfähigkeit und den Grad der Kurz- oder Weitsichtigkeit zu erkennen; dazu dient das **Optometer**.

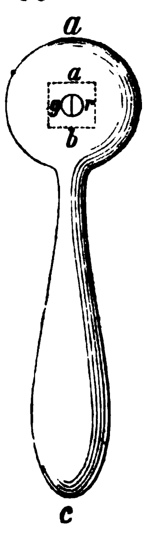


Fig. 222.

Die Ermittelung der Entf., in welcher mit oder ohne Brille gelesen werden kann, bildet kein sicheres Maß für die deutliche Sehweite, weil die Buchstaben groß genug sind, um von einem Simulanten noch bei mangelhafter Accommodation erkannt zu werden. Ruetes Optometer (1852) besteht aus einer ausziehbaren dunkeln Röhre, durch welche der zu Untersuchende sieht und am anderen Ende vorgehaltene Schrift liest; da er diese und ihre Entf. nicht kennt, so wird er sich bei beabsichtigter Täuschung bald verrathen. Young schlug (1801) Scheiners Versuch als Optometer vor; wo die Nadel beim Fixiren einfach gesehen wird, ist die deutliche Sehweite; außerhalb derselben erscheint sie doppelt. Besonders geeignet ist Steinhausers Einrichtung des Scheiner'schen Versuchs (Fig. 222): in dem Plättchen ab befindet sich eine kreisförmige Oeffnung gr, von 5^{mm} Dm., die halb mit einem grünen, halb mit einem rothen Glasscheibchen erfüllt ist, deren verticale Kittfläche genau durch den Mittelpunkt geht. Hält man die Oeffnung vor ein Auge und hinter dieselbe eine Nadel, so sieht man diese doppelt, und zwar links grün und rechts roth, wenn sie diesseits der deutlichen Sehweite ist, dagegen links roth und rechts grün, wenn sie jenseits derselben ist; befindet sie sich aber in der deutlichen Sehweite, so sieht man sie einfach und schwarz. Arenfeld schlug (1883) als Optometer ein Gitter paralleler Linien vor, die durch ein ringförmiges Diaphragma betrachtet werden; in der deutlichen Sehweite erscheinen sie gerade, diesseits X-förmig, jenseits O-förmig gekrümmt. Für die gewissenhafte Auswahl von Brillen für abnorme Augen durch Aerzte und Optiker genügen jedoch diese Optometer nicht;

es müssen dann Apparate für die Bestimmung des Nah- und Fernpunktes und anderer Eigenschaften des Auges angewendet werden, auf die hier nicht einzugehen ist.

337 **Die Brillen; die ammetropischen Augen** (Donders 1864). Augen, welche gut in der Nähe, aber undeutlich in der Ferne sehen, nennt man kurzsichtig, myopisch oder brachymetropisch; der Fehler derselben besteht darin, daß die Augenachse und der Augapfel zu lang im Verhältnisse zur Brechkraft sind; daher liegen die Vereinigungspunkte der parallelen oder schwach divergenten Strahlen ferner Lichtpunkte vor der Netzhaut, so daß auf der Netzhaut durch solche Punkte nur Zerstreuungskreise gebildet werden, die das Netzhautbild undeutlich machen. Solche Augen bedürfen für das Fernsehen der Concavbrillen, da dieselben die Divergenz der Strahlen verstärken, also die Vereinigungspunkte weiter fort und dadurch auf die Netzhaut bringen. — Augen, welche gut in der Ferne, aber undeutlich in der Nähe sehen, nennt man weitsichtig oder presbyopisch (πρέσβυς, Greis), weil normale Augen bei herannahendem Alter diesen Mangel erhalten. Der Fehler liegt darin, daß die Krystallinse, der Ciliarmuskel oder dergleichen Organe im Alter eine geringere Elasticität erhalten, wodurch die Brechkraft kleiner wird und nicht mehr ausreicht, die stark divergenten Strahlen naher Lichtpunkte auf der Netzhaut zu vereinigen. Solche Augen bedürfen für das Nahsehen der Convexbrillen, da diese die Divergenz der Strahlen vermindern. — Augen, welche in der Nähe und in der Ferne nur undeutlich sehen, werden übersichtig oder hypermetropisch genannt; der Fehler derselben besteht darin, daß der Augapfel zu kurz ist, wodurch die Strahlen sich erst hinter der Netzhaut vereinigen, also auf derselben Zerstreuungskreise bilden. Solche Augen bedürfen für Nah- und Fernsehen der Convexbrillen; bei hochgradiger Hypermetropie sind für die Nähe scharfe Brillen, für die Ferne schwächere nothwendig.

Die Myopie hielt man früher für eine Folge zu starker Brechung durch zu starke Wölbung der Linse oder der Hornhaut, die Weitsichtigkeit, die man mit der Uebersichtigkeit zusammenwarf, für das Gegentheil; erst Donders zeigte, daß an jenen beiden Organen keine Krümmungsänderungen wahrzunehmen seien, und der Augenspiegel belehrte bald über die wahre Beschaffenheit der Mängel; für die tiefere Ursache der Myopie hält man eine Verlängerung des Glaskörpers. Die Kurz- und Uebersichtigkeit sind meist angeboren und erblich; oft ist nur die Anlage angeboren und wird durch zu starke Anstrengung in der Jugend entwickelt; deßhalb sollten Kurzsichtige nur bei gutem Lichte und mit Brillen in die Ferne sehen; in der Nähe sehen dieselben feine Einzelheiten ohne Brille schärfer und ausdauernder als normale Augen; durch Nähern der Augenlider verkleinern sie die Zerstreuungskreise, wodurch ihr Blinzeln sich erklärt. Uebersichtige, besonders Kinder sollten ohne Brille nicht fixiren, weil sich sonst leicht Asthenopie oder Schwachsichtigkeit entwickelt, die indeß auch durch Augenkrankheiten entsteht. Ein anderer aus dem Bau des Auges folgender Sehmangel ist der Astigmatismus; astigmatische Augen sehen die Gegenstände verbogen und verwaschen, einen hellen Punkt als verschwommenen Streifen, wodurch sich der Name „Punktlosigkeit" erklärt. Diese Unvollkommenheit, welche in geringem Grade auch den normalen Augen anhaftet, beruht auf einem unsymmetrischen Bau der Cornea und der Linse, wodurch die Brechung nach einer Seite verstärkt wird; verbessert wird sie durch Cylinderlinsen, da dieselben auch nach einer Seite stärker brechen. Oft ist an astigmatischen Augen die Asymmetrie beider Augen verschieden oder an einem nicht vorhanden, in welchen Fällen zwei verschiedene Brillengläser getragen werden müssen. — Da die deutliche Sehweite immer etwas jenseits des Nahpunktes liegt, so haben die myopischen Augen eine kleine, die presbyopischen eine große deutliche Sehweite; dieselbe gibt also ein Urtheil über die Ammetropie der Augen und ein Mittel zur Bestimmung der Brillen.

Aus der deutlichen Sehweite findet man die Brennweite der Brille in Centim., welche der Mensch anwenden muß, damit seine deutliche Sehweite gleich 25^{cm} sei nach der Fl. $f = 25d/(d-25)$. Die Nummern der Brillen geben die Brennweite derselben an, jedoch meist noch in Zollen, in letzter Zeit aber auch in Centimetern.

Beweis. Wenn die Entf. der Netzhaut von der Krystallinse als Bildweite mit b und die Brennweite dieser mit f_1 bezeichnet wird, so ist bekanntlich $1/f_1 = 1/b + 1/d$. Das Brillenglas und das Auge bilden zusammen ein neues Linsensystem, dessen Gegenstands-

weite = 25cm sein soll und dessen Brennweite = f_2 sein möge; folglich ist $1/f_2 = 1/b + 1/25$. Subtraction der Gl. ergibt $1/f_2 - 1/f_1 = 1/25 - 1/d$. Nun ist aber die reciproke Brennweite der Verbindung zweier Linsen gleich der Summe ihrer reciproken Brennweiten, also $1/f_2 = 1/f + 1/f_1$; setzt man diesen Werth in die letzte Gl. ein, so erhält man $1/f = 1/25 - 1/d$, woraus $f = 25d/(d - 25)$. Stampfer hat den Scheiner'schen Versuch an 2 in einander verschiebbaren Röhren so angebracht, daß an der Graduirung derselben die Brillennummer abgelesen werden kann.

338 **Die chromatische und sphärische Abweichung des Auges.** Wie das Auge vermöge der Accommodation sich vor den künstlichen Linsen dadurch auszeichnet, daß es die Bilder verschieden entfernter Gegenstände an gleicher Stelle zu erzeugen vermag, so ist es auch von zwei anderen Mängeln der gewöhnlichen Linsen, nämlich von der chromatischen und sphärischen Abweichung wenigstens insofern vollständig frei, als bei gewöhnlichem Sehen die Gegenstände weder farbige noch verwaschene Ränder zeigen. Die chromatische Abweichung fällt bei gewöhnlichem Sehen dadurch weg, daß die Dispersion des Wassers und wässeriger Flüssigkeiten sehr gering, drei mal kleiner als die des Glases ist, und daß bei der schwachen, gewöhnlichen Beleuchtung die außerordentlich schmalen farbigen Ränder außerdem noch sehr lichtschwach sind und so verschwinden. Die sphärische Abweichung wird durch die Iris beseitigt, da dieselbe die Randstrahlen abhält.

Bei ungewöhnlicher oder sehr intensiver Beleuchtung treten die beiden Abweichungen indessen ziemlich merklich auf. Schon Fraunhofer (1814) beobachtete, daß er bei der Betrachtung eines Sp. durch ein Fernrohr das Ocular dem Fadenkreuze näher schieben mußte, wenn er dasselbe im violetten Lichte so deutlich sehen wollte als im rothen. Am einfachsten bemerkt man die chromatische Abweichung mittels folgenden Versuches: Hinter eine mit violettem Glase bedeckte Oeffnung eines Schirmes stellt man ein Licht und beobachtet dann den farbigen Lichtpunkt in verschiedenen Entfernungen: ist das Auge in solcher Entf., daß es für die rothen Str. accommodirt ist, so sieht man einen rothen Lichtpunkt mit violettem Zerstreuungskreise, weil jetzt zwar die rothen Str. auf der Netzhaut vereinigt werden, die violetten aber nicht; ist das Auge für die violetten Str. adaptirt, so sieht man einen violetten Lichtpunkt von einem rothen Zerstreuungskreise umgeben; in der Mitte zwischen beiden Entfernungen, wo das Auge für beide Farben gleich wenig adaptirt ist, erscheint das Licht einfarbig. Weiße Flächen, welche weiter entfernt als der Accommodationspunkt liegen, zeigen bei aufmerksamer Beobachtung einen blauen Rand, dagegen einen rothgelben, wenn sie näher als jener Punkt liegen. Die sphärische Abweichung im gewöhnlichen Sinne ist nur wenig merklich; von dem Bau des Auges rühren folgende ähnliche Erscheinungen her, die als *Astigmatismus* normaler Augen aufzufassen sind. Ein heller Lichtpunkt erscheint als Stern, wenn das Auge nicht für ihn accommodirt ist, weil die Linse einen sternförmigen Bau hat, wodurch sich auch die strahlige Gestalt der Sterne und ferner Laternen erklärt; aus demselben Grunde erscheinen helle Lichtlinien verdreifacht. Sieht man horizontale Linien scharf, so erscheinen an derselben Stelle befindliche verticale Linien undeutlich und umgekehrt, was durch Asymmetrie der Cornea erklärlich ist. — Bei dem Eindringen sehr starken Lichtes in das Auge ist man geblendet; das *Blenden* entsteht durch große, helle Zerstreuungskreise auf der Netzhaut, innerhalb deren die Bilder anderer Gegenstände verschwinden (Sehpurpur?); allmälig accommodirt sich das Auge, d. h. die Pupille zieht sich zusammen, indem die Iris sich ausdehnt, wodurch eine geringere Menge von Lichtstr. durch die nun adaptirte Linse zu einem Bilde vereinigt wird. Kommt man aus einem hellen in einen dunkleren Raum, so gelangt von den einzelnen Gegenständen zu wenig Licht durch die noch enge Pupille ins Auge; erst allmälig erweitert sich dieselbe, indem die Iris sich zusammenzieht; während dessen erholt sich die Netzhaut von der starken Einwirkung und wird für schwächere Eindrücke empfindlich, so daß die nun durch Vereinigung der größeren Strahlenbündel entstehenden Netzhautbilder empfunden werden. Die Verengerung der Pupille geschieht durch den Ringmuskel der Iris, der durch den Oculomotorius innervirt wird, die Erweiterung durch den strahligen Dilatator in der Iris, der von dem sympathischen Nerv gereizt wird. Thiere, wie die Katzen, deren Pupille eine schmale Spalte ist und daher große Unterschiede in der Größe zuläßt, können bei Tag und Nacht gut sehen, während die Eulen mit großer nicht verschließbarer Pupille bei Tage durch die Ueberfülle des Lichtes geblendet sind. Das Atropin, das Alkaloid der Belladonna erweitert die Pupille, die Lactuca verengert dieselbe.

339 **Die entoptischen Erscheinungen.** Werden Netzhautbilder empfunden, welche durch Gegenstände im Auge selbst hervorgebracht werden, so nennt man diese Wahrnehmungen entoptische Erscheinungen. Gegenstände auf den vorderen Augentheilen nimmt man nur durch künstliche Beleuchtung wahr, indem man durch eine Schirmöffnung sieht, die sich im Brennpunkte einer großen, flachen Linse befindet und durch dieselbe das Licht einer Kerzenflamme erhält. Man sieht dann das Gesichtsfeld durch die Iris begrenzt, kann in dem Kreisrande derselben Zacken, Einschnitte u. dgl. erkennen, sieht die Flüssigkeiten auf der Hornhaut als helle Streifen oder helle Punkte, die beim Blinzeln verschwinden oder sich

verändern, und bemerkt als feste von der Linse herrührende Erscheinungen dunkle und helle Flecken, helle Streifen, die eine Art Stern bilden, und dunkle radiale Linien, die von dem strahligen Bau der Linse herrühren mögen. Mit freiem Auge sieht man Gegenstände, die in dem Glaskörper schweben; Zellen, die sich in Schleimstoff umwandeln, erscheinen als isolirte Kreise, die bei lebhafter Augenbewegung von unten aufsteigen und sich dann langsam wieder senken; mit Körnern besetzte Fasern erscheinen als Perlschnüre, kleine Körnerhaufen als Gruppen von dunkeln Kreisen, Hautreste, die in der Glashaut schwimmen, zeigen sich als hellere Bänder von dunkeln Linien begrenzt. Alle diese Erscheinungen nennt man zusammen fliegende Mücken (mouches volantes). Sie haben das Gemeinsame, daß sie beim Fixiren dem Fixationspunkte voraneilen und so dem Blicke weghuschen; sie sind nach Donders Reste des embryonalen Baues des Glaskörpers, dessen Zellen später zu Schleim zerfließen, während ein Theil ihrer Membranen und Kerne zurückbleibt. Von der Netzhaut selbst kann man (Purkinje 1819) die Schatten sehen, welche die in den obersten Schichten befindlichen Blutgefäße auf die Stäbchenschicht werfen, wenn man diese Schatten auf andere als die gewöhnlichen Stellen bringt und ihre Stellen stets verändert. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß man eine helle Lichtflamme unterhalb oder seitlich vom Auge hin und her bewegt und dabei auf einen dunkeln Hintergrund sieht; bald erscheint dann der dunkle Hintergrund von einem mattweißlichen Schleier überzogen, auf dem sich dunkle Gefäßbäumme abzeichnen; in der Mitte des Gesichtsfeldes entsteht eine weißliche Scheibe mit einem halbmondförmigen Schatten, nach H. Müller der Schatten der Netzhautgrube.

340 **Die Lichtempfindung** besteht in einer Reizung des Sehnerven. Wie jeder Reiz eines motorischen Nerven eine Zusammenziehung von Muskeln zur Folge hat, so erregt jeder Reiz eines sensiblen Nerven Empfindungen, und so erweckt auch jeder Reiz des Sehnerven eine Gesichtsempfindung. Am leichtesten wird der Sehnerv durch die Aetherwellen des Lichtes gereizt; doch bringt auch mechanische Einwirkung wie Schlag, Stoß und Druck gegen das Auge, heftige Augenbewegung, rasche Accommodation Lichtempfindungen hervor; ebenso entstehen solche durch Krankheitszustände des Auges und anderer Körpertheile, ja durch die Lebenswirkung des Auges selbst; besonders hervorragend sind die Lichtempfindungen durch den elektrischen Schlag, das Oeffnen und Schließen eines elektrischen Stromes, wie durch den elektrischen Strom selbst. (Gesetz der specifischen Sinnes-Energieen).

Durch einen Schlag oder Stoß aufs Auge entsteht ein blitzähnlicher Schein durch das ganze Gesichtsfeld, der aber wie alle Lichtempfindungen nur subjectiver Natur ist und nicht, wie man manchmal glaubte, erhellend nach außen wirkt. Ein leichter Stoß auf eine Stelle des Augapfels erzeugt einen hellen Fleck, Druckbild oder Phosphen genannt, an der entgegengesetzten Stelle der Netzhaut; ein dauernder Druck ruft glänzende, wechselnde Figuren, sternförmig und rhombisch, hell und dunkel im Gesichtsfelde hervor. Bei schnellen Augenbewegungen und rascher Accommodation entstehen feurige Ringe, während beim Durchschneiden des Sehnerven ein ganzes Meer von Licht sich auszubreiten scheint. Bei Krankheiten können durch vermehrten Druck des Blutes oder der Augenflüssigkeiten, durch chemische Reizung bei Blutveränderung, durch Uebertragung eines Gehirnreizes auf den Sehnerven, ja selbst durch Fortpflanzung des Erregungszustandes eines Gehirntheiles bei irgend einer Vorstellung auf den Sehapparat, allerlei subjective Lichterscheinungen entstehen, wie ganz erleuchtete Gesichtsfelder, helle Flecken, Phantasmen in der Gestalt von Menschen und Thieren u. s. w. Das Auge selbst erzeugt durch sein inneres Leben im dunkeln Gesichtsfelde ein unregelmäßiges, schwaches Leuchten mit mannigfachen Figuren, wandelnde Nebelstreifen (Goethe) und sogar Phantasmen. Geht ein elektrischer Schlag durch den Kopf oder wird durch denselben ein el. Strom geöffnet oder geschlossen, so erscheinen Lichtblitze; der constant durchgehende Strom erzeugt ein weißlich violettes oder ein dunkleres rothgelbes Gesichtsfeld, je nachdem der positive oder der negative Strom den Sehnerven hinauf zum Gehirne geht.

341 Der Ort der Aufnahme der Lichtempfindung (der Lichtperception) ist die Stäbchenschicht der Netzhaut.

Das normale Reizmittel des Sehnerven, die Wellenbewegung des Aethers, wirkt nicht direct auf den Sehnerven, da bekanntlich die Eintrittstelle desselben den blinden Fleck bildet, und wirkt auch nicht direct auf die Verzweigung desselben in der Netzhaut, da sonst in der Nähe der Eintrittsstelle viele Nerven gleichzeitig getroffen würden und dadurch der Lichteindruck bedeutend erweitert werden müßte, und da es sonst unmöglich wäre, die Schatten der Netzhautgefäße zu sehen, welche theils in, theils noch unter den Nervenverzweigungen, in den sogenannten Körnerschichten ihre Lage haben, und ihren Schatten doch nur auf eine tiefere Schicht werfen können. Tiefer liegt nur noch die Stäbchenschicht; also ist diese das Organ der Lichtperception.

342 Die **Ausdehnung** der Lichtempfindung hängt von der Größe des Netzhautbildes, also von dem Gesichtswinkel ab; die kleinste Lichtempfindung findet statt, wenn das Netzhautbild die Grundfläche eines einzigen Zapfens oder Stäbchens ganz oder theilweise erfüllt. Hieraus ergibt sich, daß bei gewöhnlichem Lichte der **Gesichtswinkel** des kleinsten, sichtbaren Gegenstandes $^1/_2$ Minute beträgt.

Jeder Zapfen und jedes Stäbchen kann nur eine Lichtempfindung hervorbringen; füllt das Netzhautbild die Grundfläche eines Stäbchens, dessen Durchmesser bekanntlich = 0,002mm, so ergibt eine einfache Rechnung mit Hilfe der Dimensionen von Listings schematischem Auge den zugehörigen Gesichtswinkel = ca. 30″. Ist aber das Netzhautbild kleiner als die Grundfläche eines Elementes der Stäbchenschicht, so wird sich seine Wirkung auf das ganze Element vertheilen und dadurch schwächen; es kann daher ein Gegenstand unter kleinerem Gesichtswinkel als $^1/_2$ Minute nur dann sichtbar sein, wenn er stärker beleuchtet ist oder sich dunkel von hellem Grunde abhebt. So haben die Fixsterne einen Gesichtswinkel kleiner als 1″; ein glänzender Silberdraht auf dunkelm Grunde ist noch bei 2″ Gesichtswinkel sichtbar; Volkmann sah ein Haar auf dunkelm Hintergrunde unter 14″, ein Schüler Bars sogar unter 1″.

343 Auch die **Schärfe** der Lichtempfindung d. i. die Fähigkeit, getrennte Gegenstände auch getrennt wahrzunehmen, hängt theilweise von der Größe der Netzhautelemente ab. Zwei helle Punkte können nur dann in allen Augenlagen als zwei erkannt werden, wenn der Abstand ihrer Bilder größer ist als die Breite eines Netzhautelementes. Außerdem ist die Unterscheidungsfähigkeit noch bedingt durch die Zahl der Elemente auf einem bestimmten Flächentheile, dann durch die Empfindlichkeit derselben, durch die physische Vollkommenheit des Individuums und durch die physikalische Vollkommenheit des Auges.

Nach Hooke erscheinen zwei Sterne als ein Stern, wenn ihre Entfernung weniger als 30″ beträgt; ja unter Hunderten kann kaum Einer die beiden Sterne getrennt sehen, wenn sie einen Abstand von 60″ haben. Die Drähte eines Parallelgitters vor einem hellen Hintergrunde werden nur dann getrennt wahrgenommen, wenn die Abstände ihrer Achsen einem Gesichtswinkel von ca. 1′ entsprechen. Die hellen Zwischenräume erscheinen hierbei nicht geradlinig, wie sie es in Wirklichkeit sind, sondern mit Anschwellungen und Einschnürungen versehen, weil die Enden der Netzhautelemente nicht rechteckige Streifen bilden, sondern bald breite, bald schmale Stellen darbieten, wie alle aus Vielecken zusammengesetzten Streifen.

344 Die **Stärke** der Lichtempfindung hängt außer von der Empfindlichkeit der Netzhaut und der Vollkommenheit des Auges von der Helligkeit des Lichtes und der Farbe desselben ab, d. i. von der lebendigen Kraft und von der Zahl der Aetherschwingungen. Was die Helligkeit anbelangt, so ist bei gewöhnlicher Helligkeit das Auge am empfindlichsten für Veränderungen um kleine Bruchtheile derselben; innerhalb der Grenzen gewöhnlicher Helligkeit, welche von dem Grade, wo Lesen, Schreiben und Arbeiten am bequemsten geschieht, bis zu der Helligkeit eines sonnenbeschienenen weißen Papiers zu rechnen ist, entsprechen gleichen Bruchtheilen der Helligkeit auch gleiche Zu- oder Abnahmen der Empfindungsstärke, (**Fechners psychophysiches Gesetz**). Hieraus folgt zunächst, daß bei geringer Helligkeit die Empfinungsstärke nahezu proportional ist der Lichtstärke selbst, daß aber bei großer ichtstärke geringe Zu- oder Abnahmen der Helligkeit keinen Einfluß auf die Empfindung haben. Indessen gilt Fechners Gesetz weder für allzu große Helligeit, weil hier das Organ zu leiden beginnt, noch für allzu geringe, weil sich hier as Eigenlicht des Auges geltend macht; es gilt auch für mittlere Grade der Helligeit nicht absolut genau. Hinsichtlich der Farbe ist der Eindruck von Gelb am ellsten und von Violett am dunkelsten. Doch ist auch hier die Helligkeit von Einfluß; bei heller Beleuchtung machen die rothen und gelben, bei schwacher die lauen und violetten Strahlen den stärkeren Eindruck auf das Auge.

Gemälde und Zeichnungen, welche vielerlei Abstufungen von Schatten und Licht haben, nd bei dem schwachen Kerzenlichte und dem hellen Tageslichte gleich deutlich. Sieht man urch verdunkelte Gläser nach Wolken, so bemerkt man nicht weniger Lichtstufen als mit reiem Auge. In guten stereoskopischen Photographien aber sieht man nach dem Himmel

gerichtet zärtere Abstufungen als bei Tages- oder Lampenlicht. Der kleinste wahrnehmbare Bruchtheil der Helligkeit beträgt $^1/_{60}$ bis $^1/_{130}$; ist die Differenz geringer, so verschwindet sie für uns. Ein Schatten, den Mondlicht erzeugt, verschwindet bei hellem Lampenlichte, und dessen Schatten bei Sonnenlicht. Bilder einer Glasplatte verschwinden vor hellem Tageslichte, die Sterne sind bei Tage unsichtbar u. s. w.; dagegen erscheinen bei Nacht helle Gegenstände im Verhältnisse zu ihrer Umgebung viel heller als bei Tage; die Maler beachten dies bei Mondscheinlandschaften. Nach Dobrowolsky (1872) ist der kleinste wahrnehmbare Bruchtheil der Helligkeit bei verschiedenen Farben verschieden, für Roth am größten ($^1/_{20}$), für Blau am kleinsten ($^1/_{200}$). Hiermit stimmen die Thatsachen, daß bei Halbdunkel Blau noch hell ist, während Roth schon verschwunden ist, daß die Seitentheile der Retina rothblind sind, daß Rothblindheit am häufigsten vorkommt, daß mancher schwarze Staar mit Rothblindheit beginnt, und daß die zur Wahrnehmung von Roth nöthige Zeit, die Dauer der Reizung, dreimal so groß sein muß als beim Blau.

345 **Die Irradiation** (Keppler 1604) ist die Erscheinung, daß helle Flächen größer erscheinen als gleich große dunkle, daß daher nahe beisammen liegende helle Flächen für das Auge zusammenfließen und gerade dunkle Linien vor einem hellen Lichte wie durch einen weißen Einschnitt unterbrochen aussehen. Besonders stark treten diese Erscheinungen bei unvollkommener Accommodation auf. Sie rühren davon her, daß bei unvollkommener Accommodation große Zerstreuungskreise statt der Lichtpunkte entstehen, und daß auch bei vollkommener Accommodation sich kleine Zerstreuungskreise wegen des unsymmetrischen Augenbaues bilden.

Durch diese Zerstreuungskreise wird der Rand des Netzhautbildes weiter gerückt, als es nach der geom. Constr. sein sollte. So greift der helle Rand einer weißen Fläche über den dunkeln Rand einer angrenzenden schwarzen Fläche über; das Umgekehrte findet aber ebenfalls statt. Es wird daher die Helligkeit der weißen Fläche schon vor ihrer Grenzlinie geschwächt, aber auch die Dunkelheit der schwarzen Fläche jenseits ihrer Grenzlinie aufgehoben und durch Hell ersetzt. Demnach würde jede helle Fläche durch allmälige Abstufungen in ihre dunkle Grenzfläche übergehen müssen, wenn nicht nach 344. bei großer Helligkeit schwache Differenzen derselben unmerklich blieben. Die geringe Lichtabnahme des hellen Randes wird dadurch unsichtbar, die Erweiterung desselben in die dunkle Fläche aber sichtbar sein, und zwar um so weiter, je näher die obere Grenze der gewöhnlichen Helligkeit an den Peripherieen der Zerstreuungskreise liegt, je heller also die weiße Fläche ist. Jenseits der Stelle, wo die Helligkeit ihr Maximum erreicht hat, verläuft sie allmälig in das Dunkel. Am deutlichsten sind diese verwaschenen Ränder bei unvollkommener Accommodation. — Irradiations-Versuche sind: Ein weißes Quadrat auf schwarzem Felde sieht größer aus als ein daneben liegendes schwarzes Quadrat auf weißem Felde; ebenso ein weißer Streifen auf schwarzem Grunde genau unter einem gleich breiten schwarzen Streifen auf weißem Grunde. Ein feiner Draht vor einer hellen Flamme verschwindet; die hellen Felder eines Schachbrettes fließen an den Ecken zusammen. Wenn man die Kante eines Lineals zwischen das Auge und ein helles Licht bringt, so zeigt die Kante vor dem Lichte einen Einschnitt. Helle Quadrate auf dunkelm Grunde erscheinen in ihrer Höhe, dunkle auf hellem Grunde in ihrer Breite vergrößert, weil die Zerstreuungskreise etwas höher als breit, demnach eigentlich Ellipsen sind. Vermöge der Irradiation sieht die helle Mondsichel so aus, als ob sie einem größeren Kreise angehöre, als der neben ihr befindliche verfinsterte Theil oder als das vom Erdscheine erzeugte aschfarbige Licht des Mondes; aus demselben Grunde erscheinen Menschen in dunkeln Kleidern schlanker als in hellen u. s. w. — Keppler benutzte schon die Zerstreuung des Lichtes auf der Netzhaut zur Erklärung, Plateau (1838) behauptete eine Miterregung der Nachbarstellen des Netzhautbildes, Welcker (1852) zeigte dagegen an zahlreichen Erscheinungen die Mitwirkung der Zerstreuungskreise und Volkmann (1863) die negative Irradiation, die Vergrößerung des Dunkeln auf Kosten des Hellen, wonach Helmholtz (1867) obige Erklärung gab. Jedoch wiesen Aubert (1865) und Mach (1866) auf die Mitwirkung des Contrastes hin und Hering (1874) wieder mehr an Plateau sich anschließend auf die Wechselwirkung verschiedener Netzhautstellen.

346 **Die Dauer der Lichtempfindung.** Wie ein Muskel, der von einem durch seinen Nerven gehenden elektrischen Schlage gereizt wird, $^1/_6$ Sec. lang im Zustande der Contraction verbleibt, so hält auch die Lichtwirkung auf das Auge noch an, wenn das Licht verlöscht ist. Die Dauer der Nachwirkung ist um so größer, je stärker das Licht und je weniger ermüdet das Auge ist; die durch die Nachwirkung verursachte Empfindung nennt man das Nachbild oder Blendungsbild. Bei starkem Lichte nimmt das Nachbild rascher an Helle ab als bei

schwachem, dauert aber doch länger; die Nachdauer des hellen Sonnenbildes kann sich auf einige Minuten erstrecken; bei mittlerer Tageshelle beträgt die Nachdauer 1/7 Sec. Auch die Farbe ist von Einfluß auf die Dauer des Nachbildes. Wie von den 4 Farben Weiß, Gelb, Roth, Blau die erste am weitesten sichtbar ist und die letzte am wenigsten weit, so hat auch die erste die längste und die letzte die kürzeste Nachwirkung; nach Külp ist die Dauer des Nachbildes der 4 Farben bei mäßigem Lichte 0,1″; 0,09″; 0,08″; 0,066″. Vermöge der Nachwirkung bringen schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art denselben Effect hervor wie eine continuirliche Beleuchtung. Wird hierbei eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem Lichte getroffen, so ist die Lichtstärke gleich dem arithmetischen Mittel der einzelnen Lichtintensitäten. Die Nachwirkung hat Anwendung in den Wunderscheiben, Wundertrommeln und Farbenkreiseln.

Sieht man einen Augenblick nach der Sonne und schließt dann die Augen, so sieht man noch das Bild der Sonne, allmälig erblassend und farbenwechselnd. Schließt man das Auge nach längerem Fixiren einer dunkeln Zeichnung auf weißem Grunde, so sieht man zuerst schwach dieselbe Erscheinung, allmälig aber mit umgekehrter Lichtvertheilung. Die Wunderscheibe oder das Thaumatrop von Paris (1827) ist ein rechteckiges um eine Achse drehbares Täfelchen, auf dessen beide Seiten zusammengehörige Gegenstände gezeichnet sind, z. B. ein Käfig und ein Vogel; bei der Drehung scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Auf demselben Princip beruhen die stroboskopischen Scheiben von Stampfer (1832) und das ganz gleiche Phenakistoskop von Plateau (1832) (στροβέω, im Kreise herumdrehen; φέναξ, Lügner). Eine große Scheibe mit Randöffnungen und eine kleinere mit Zeichnungen von Gegenständen in verschiedenen Phasen einer Bewegung werden auf einer Achse gedreht, während man durch die Oeffnungen das Spiegelbild der kleinen Scheibe betrachtet; die Gegenstände scheinen dann die Bewegung auszuführen. Aehnlich ist das Dädaleum von Horner und die Zoetrope (ζωή, Leben; τροπή, Wendung) oder Wundertrommel. Das Continuirlichwerden eines oft wiederholten Lichteindruckes ist aus dem Leben bekannt. Eine glühende Kohle im Kreise geschwungen bildet einen feurigen Kreis, der Blitz erscheint linienförmig, obwohl er nur ein fortschreitender Funke ist, die Speichen eines rollenden Rades verschwinden. Jeder rasch sich bewegende leuchtende Gegenstand bildet eine leuchtende Linie oder Fläche, in welcher der einzelne Eindruck verschwindet. Der einzelne Eindruck eines rasch bewegten Gegenstandes tritt wieder auf, wenn derselbe nur für einen Moment beleuchtet wird, oder wenn man einzelne Eindrücke auf verschiedene Stellen der Netzhaut bringt; ein fliegender Vogel, ein rollendes Rad vom Blitze beleuchtet erscheinen ruhend. Hierauf beruht die optische Analyse der chemischen Harmonica, der Pfeifentöne, die Analyse der Wasserstrahlen u. s. w.; überhaupt hat die Nachwirkung des Lichtes zahlreiche wissenschaftliche Anwendungen: Müllers Wellenscheibe, Lissajous' Lichtfiguren, das Kaleidophon, die Bestimmung der Geschw. der El. von Wheatstone, der Farbenkreisel. Werden auf die Oberfläche eines Kreisels sectorförmig mehrere Farben gebracht, so mischt sich bei der Drehung der Eindruck derselben im Auge; daher dient der Farbenkreisel zum Studium der Mischfarben. Auch das obige Gesetz über die Mischung der Lichtintensitäten läßt sich am Farbenkreisel nachweisen, indem man auf verschieden vom Mittelpunkte entfernte Ringe Grau, dann Weiß und Schwarz in gleichem oder verschiedenem Verhältnisse anbringt und dann bei der Drehung gleiche oder verschiedene Nüancen von Grau erhält; wegen dieses Gesetzes erscheint der Regenbogenfarbenkreisel nicht vollkommen weiß. — Werden die zwei Scheiben des Phenakistoskops mit verschiedener Geschwindigkeit gedreht, so erscheinen die Figuren verzerrt; umgekehrt können verzerrt gezeichnete Figuren dann richtig erscheinen; Plateaus Anorthoskop (1836) (ἀνορθόω, herstellen).

Die Nachbilder (Fechner 1838). Die Reizung der Netzhaut durch Licht dauert länger als die Lichteinwirkung; diese Reizung vermindert an der getroffenen Netzhautstelle die Reizempfänglichkeit und schafft so einen Zustand, den man Ermüdung nennt; in dem Raume, den das Netzhautbild einnimmt, sind die von starkem Lichte getroffenen Stellen mehr ermüdet als die dunkleren Stellen; gelangt daher ein neuer Lichteindruck auf diesen Raum, so werden die ersteren Stellen denselben weniger lebhaft empfinden als die letzteren, die ersteren werden dunkler, die letzteren heller sein. Während also gleich nach dem ersten Lichteindrucke ein Nachbild entsteht, das dem Gegenstande in Hell und Dunkel gleich ist, muß bei dem zweiten Lichteindrucke ein neues Nachbild auftreten, in welchem Hell und Dunkel verwechselt erscheinen; das 347

erstere wird positives, das letztere negatives Nachbild genannt. Läßt man auf ein positives, nur aus Weiß und Dunkel bestehendes Nachbild kein neues Licht treffen, sondern dasselbe ruhig weiter wirken, so verschwindet es allmälig, indem das Weiß durch grünliches Blau in Indigo, dann in Violett oder Rosa übergeht und mit grauem Orange zerrinnt; man nennt diese Erscheinung das farbige Abklingen der Nachbilder. Farbige Objecte erscheinen im positiven Nachbilde mit derselben Farbe, im negativen mit der complementären Farbe.

Bei dem (für die Augen sehr gefährlichen) Studium der Nachbilder schließe man zuerst einige Zeit die Augen, um alle Reste früherer Bilder zu vertilgen. Um nun ein positives Nachbild zu erhalten, betrachte man etwa ⅓ Sec. lang eine helle Fensterfläche oder einen Kupferstich mit schwarzem Rahmen und schließe dann wieder die Augen, so wird man den Gegenstand mit derselben Lichtvertheilung sehen, in Einzelheiten sogar genauer als bei dem raschen directen Sehen. Um ein negatives Nachbild zu erhalten, fixire man das Fenster länger, bei mäßiger Beleuchtung 5—10 Sec.; dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stark und dauernd, oft 10 Min. lang. Beide Bilder fliehen vor dem Fixationspunkte her wie fliegende Mücken, bleiben aber beim Fixiren eines Gegenstandes stehen. Das negative Nachbild ist nur sichtbar, wenn neues Licht auf die Netzhaut wirkt; oft reicht hierzu das durch die geschlossenen Lider eindringende oder auch das Eigenlicht des Auges aus; wenn nicht, so richte man das offene Auge auf eine mäßig helle Wand oder lasse durch schwaches Blinzeln etwas Licht ein. In dem letzten Falle tritt manchmal ein Wechsel zwischen positiven und negativen Nachbildern ein, weil jeder Reiz auf ermüdete Nerven zwar schwächer ist, aber länger dauert, und weil daher der directe Reiz nach dem Schwinden des negativen Bildes wieder eintritt. Daß eine Lichtwirkung auf schon gereizte Netzhautstellen schwächer empfunden wird, zeigt folgender Versuch: Man betrachte ein auf grauem Grunde liegendes schwarzes Stück Papier und ziehe dasselbe dann weg, so sieht man ein hellgraues Nachbild auf dunkelgrauem Grunde; die Netzhautstelle, auf welcher das schwarze Bild sich befand, ist nicht ermüdet, sieht daher das Grau heller, als die ringsum liegenden schon länger durch das Grau beanspruchten Stellen; hierin liegt der Grund, daß für das positive Nachbild ein kurzes Fixiren nothwendig ist. — Auch bei farbigen Objecten ist dies zu beachten. Man legt ein farbiges Stück Papier auf grauen Grund, betrachtet es für einen Moment und zieht es dann weg, so sieht man auf derselben Stelle das positive Nachbild, über das sich bald ein rosenrother Schein ergießt, dann folgen gelblich graue Töne, in denen das positive Bild oft in ein sehr schwaches negatives übergeht. Durch längere Fixation erhält man negative complementäre Nachbilder, von Roth Blaugrün, von Gelb Blau u. s. w.; denn durch das längere Fixiren von Roth sind die rothen Nervenfasern (nach Young) stark ermüdet, die grünen und violetten nur sehr wenig; richtet man nun das Auge auf weißes Licht, so werden an der betreffenden Netzhautstelle die rothen Fasern nicht oder nur sehr wenig, die grünen und violetten aber stark gereizt, wodurch ein blaugrüner Eindruck entsteht. Grüne Brillen geben rothe Nachbilder, eine grüne Rose mit rothem Stengel erscheint im Nachbilde richtig gefärbt. — Ein grünes Object auf gelbem Grunde gibt ein rothgelbes, auf blauem Grunde ein violettes Nachbild; die hier möglichen mannigfaltigen Erscheinungen erklären sich sämmtlich leicht nach Youngs Theorie. Ein schwarzes Quadrat auf farbigem Grunde gibt ein helleres, gesättigteres Nachbild als der Grund selbst, weil die schwarze Stelle der Netzhaut nicht ermüdet ist für die Farbe, während der übrige Theil der Netzhaut dieselbe schwächer empfindet. Aus diesem Grunde verliert jede Farbe bei längerem Anschauen ihre Sättigung, ja erscheint sogar graulich, weil bei der Ermüdung der einen Nervenfaser die schwache Wirkung auf die zwei anderen zur Geltung kommt, welche sich mit der Wirkung auf die erste Faser zu Grau vereinigt. Hat das farbige Quadrat eine Farbe, die zu der des Grundes complementär ist, so erscheint im Nachbilde der Grund gesättigter, selbst wenn er homogen ist; denn ist z. B. das Quadrat blaugrün, so ermüdet es die grünen und violetten Fasern; dieselben werden dann von einem rothen Grunde nicht gereizt, und es entsteht im Nachbilde ein reineres Roth als das Spectralroth, weil dieses die unermüdeten grünen und violetten Fasern schwach mitreizt. — *Das farbige Abklingen der Nachbilder* beruht darauf, daß die Reizung der drei Fasern der Grundfarben verschiedenartig abnimmt, Roth anfänglich sehr stark und dann sehr schwach, Violett anfänglich stark und dann schwächer, Grün fast gleichmäßig; deßhalb herrscht bald Grünblau vor, aus welchem dann das Grün schwindet, um dem bleibenden Violett und Roth als Rosa Platz zu machen. Später mischt sich das Eigenlicht des Auges zu graulichem Orange ein, oder es entsteht bei neu eindringendem Lichte wegen der verschiedenartigen Ermüdung eine ganze Reihe von Phasen des negativen Nachbildes, welche am deutlichsten nach einem Fixiren der Sonne gesehen werden können; auch Nachbilder farbiger Objecte klingen in solcher Weise ab, sowie rotirende Scheiben mit schwarzen und weißen Sectoren.

348 **Der Contrast** (Brücke 1850). Unter Contrast versteht man die Einwirkung von neben einander stehenden Farben und Helligkeiten auf einander. Chevreul bezeichnet die hierher gehörigen Erscheinungen genauer mit dem Namen des simultanen (gleichzeitigen) Contrastes und unterscheidet hiervon den successiven (nachfolgenden) Contrast, die Wirkung zweier Farben auf einander, die nach einander auf derselben Stelle der Netzhaut erscheinen. Brücke nennt die durch Contrast hervorgerufene Farbe die inducirte Farbe, und diejenige, welche die Ursache der inducirten ist, die inducirende. Die Erscheinungen des successiven Contrastes sind wie die negativen complementären Nachbilder Folgen der Ermüdung. Durch das Sehen einer inducirenden Farbe wird das Auge für dieselbe ermüdet; richtet sich dasselbe nun auf ein „reagirendes" Feld, so kann es in demselben jene Farbe nicht mehr völlig wahrnehmen; ist das Feld von gleicher Farbe, so ist die „resultirende" Farbe weißlich, ist es complementär, gesättigter, ist es gemischt, so enthält die resultirende Mischung die inducirende Farbe nicht mehr oder nur schwach. Der successive Contrast kommt auch in den meisten Fällen zur Wirkung, die man herkömmlich zum simultanen Contrast rechnet, weil beim gewöhnlichen Sehen der Blick nicht fest auf einen Punkt gerichtet ist, sondern fortwährend wandert, um das Bild auf immer neue, unermüdete Stellen der Netzhaut zu bringen.

Legt man auf einen rothen Papierbogen einen weißen, grauen oder schwarzen Kreis, so erscheint derselbe blaugrün, weil wegen „des Wanderns des Blickes" die ganze Netzhaut für Roth ermüdet und daher nur die 2 anderen Grundbestandtheile des Weiß empfinden kann; der schwarze Kreis ist ebenso wenig wie der graue frei von weißem Lichte, und dieses weiße Licht ist es, was blaugrün erscheint. Auf gelbem Grunde erscheint sogar Schwarz und Grau reiner in dem complementären Blau, weil auf rein weißem Grunde sich diesem zuviel von dem nach Aubert röthlichen Tageslichte zumischt, wodurch ein weißer Kreis in violettem Contrast auftritt; ebenso erscheinen Grau und Schwarz auf blauem Grunde mehr gelb, während Weiß sich mehr dem Orange nähert. Ist das inducirende Feld groß und lichtstark und das „reagirende" klein, so kann selbst eine lebhafte Farbe desselben fast in die complementäre übergehen; ein kleines Stück mennigrothes Papier kann auf einer gegen den Himmel gehaltenen rothen Glasscheibe blaugrün erscheinen. Doch fehlt die Contrastwirkung auch nicht, wenn beide Felder gleich groß sind, nur ist die Wirkung dann gegenseitig. Ein gelber und ein rother Streifen, welcher in einiger Entfernung von ganz gleichen Streifen neben einander liegen, sind so verändert, daß der gelbe grünlich und der rothe purpurn aussieht, während die entfernteren Streifen unverändert bleiben, da der bis zu ihnen wandernde Blick sich wieder erholt hat; bei breiteren Feldern tritt deßhalb die Contrastwirkung namentlich an den Grenzrändern auf. Ebenso erscheint mäßig hell neben Dunkel heller, neben starker Helle dunkel, weil beim Wandern der Netzhaut auf das mäßig Helle im ersten Falle weniger müde, im letzteren Falle mehr ermüdete Stellen der Netzhaut gerichtet sind. Auch eine Farbe auf einer anderen verändert sich; ein mennigfarbiges Muster scheint auf Purpur mehr gelb, auf Grün mehr roth zu sein.

349 Der rein simultane Contrast, der im Ganzen ähnliche Erscheinungen wie der successiv-simultane bietet, ist nach Helmholtz nicht eine Veränderung der Empfindung, sondern der Beurtheilung. Jeder starke Eindruck wird nur im ersten Moment von uns richtig beurtheilt; er sinkt bald bis zur Neutralität herab; folgt dann der Eindruck der Neutralität, so macht dieselbe den entgegengesetzten Eindruck. Parallele Linien erscheinen uns convergirend, wenn divergente Linien durch sie gehen (Fig. 224). Halten wir in raschem Fahren plötzlich still, so scheinen die Gegenstände auf uns zu zu laufen, die sich vorher von uns entfernten. Gibt man der Fig. 223 mit der Hand eine fortdauernde kleine Drehung, so scheinen alle concentrischen Kreise in derselben Richtung zu rotiren, das Zahnrad in der Mitte aber in entgegengesetzter Richtung. Ebenso erscheint uns eine Farbe, die wir fest fixiren, allmälig immer weißlicher, und wirkliches Weiß daneben complementär. Dann sind Täuschungen in der Beurtheilung kleiner Unterschiede leichter möglich; daher tritt der simultane Contrast bei schwachen Unterschieden deutlicher auf. Bei zu starken Unterschieden kann sich die eine Farbe durch die Flüssigkeiten des Auges so

zerstreuen, daß sie auch auf ein kleines reagirendes Feld übergeht; dasselbe kommt aber auch bei nicht starken Unterschieden vor, wenn die Fixation zu lange dauert, weil hierdurch alle Unterschiede verlöschen.

Fig. 223.



Die interessanteste der hierhergehörigen Erscheinungen bilden die farbigen Schatten; von den 2 Schatten, die ein von Tageslicht und Kerzenlicht beleuchteter Stift auf eine weiße Tafel wirft, erscheint der Schatten des Tageslichtes röthlichgelb und der des Kerzenlichtes blau, der Grund weiß. Daß dieses Blau nur eine Wirkung des Urtheils ist, zeigt folgender Versuch: Man blickt durch eine schwarze Röhre auf ein Stelle, die theils dem Grunde, theils dem Schatten des Kerzenlichtes angehört; dann erscheint der zweite Theil blau; rückt man nun die Röhre so, daß man nichts als Schatten des Kerzenlichtes sieht, so erscheint das ganze Gesichtsfeld blau, und bleibt auch so, wenn die Kerze verlöscht; das Blau verschwindet erst, wenn man dann die Röhre vom Auge nimmt. Noch interessanter werden diese Versuche, wenn man das eine oder beide Lichter durch farbige Gläser gehen läßt und dadurch färbt. Immer erscheint bald der ganze Grund weiß und der eine Schatten complementär zu dem anderen. Auch wenn man durch ein farbiges Glas sieht, wird bald in unserem Urtheil alles Helle weiß, wenn das Glas nicht homogen ist, weil die Young'sche Faser der Hauptfarbe bald ermüdet, und dann ihren schwachen Reiz mit denen der beiden anderen Fasern zu Weiß vereinigt; dagegen durch ein homogenes z. B. rothes Glas gesehen, erscheint uns alles Helle roth, wozu noch das Eigenlicht der Netzhaut mitwirkt, weil vermöge desselben dann alles Dunkle grün aussieht. Weißes Papier bei gelbrothem Kerzenlichte erscheint uns weiß, dagegen durch die dunkle Röhre gesehen gelbroth. So erscheint uns jede farbige Fläche allmälig weißlich und daher jedes kleine Feld auf derselben, das einigermaßen Weiß enthält, complementär. Legt man auf einen großen farbigen Bogen ein kleines, graues Papierstückchen, so erscheint dies bald complementär; auf einem Quartblatte geschieht dies nicht; dagegen geschieht es auch auf diesem, wenn man dasselbe sammt dem Schnitzelchen mit einem durchscheinenden weißen Briefblatte bedeckt. Auf dem Briefblatte selbst aber hat ein Schnitzelchen die complementäre Farbe nicht; ja das untere Schnitzelchen verliert sogar seine complementäre Contrastfarbe, wenn man es mit dem oberen vergleichend beobachtet, oder wenn man seine Umrisse mit Strichen nachfährt. Dieser Versuch zeigt schlagend die Wirkung kleiner Unterschiede, beweist aber auch, daß diese Unterschiede nur in der Farbe bestehen dürfen. Beides ist auch noch aus folgendem Versuche ersichtlich: ein Farbenkreisel enthält 4 schmale rothe Sectoren, die in der Mitte von einem schwarzweißen Felde unterbrochen sind; beim Drehen erscheint die Scheibe schwach roth mit einem blaugrünen Ringe an der Stelle der Felder; dieser Ring verliert aber seine Farbe, wenn er mit Linien eingefaßt wird, oder wenn die rothen Sectoren zu groß sind. — Nach Burckhardt (1865) tritt der gleichzeitige Contrast nicht blos beim directen Sehen, sondern auch im Nachbilde auf; und zwar ist er im Nachbilde immer stärker als beim directen Sehen; er tritt im Nachbilde mit großer Bestimmtheit auf, wenn er im directen Bilde entweder ganz fehlt oder auf jede Weise geschwächt worden ist. Betrachtet man z. B. ein weißes Quadrat auf rothem Grunde, so sieht man im Nachbilde

ein rothes Quadrat auf blaugrünem Grunde. Fixirt man eine Scheibe mit 2 farbigen Sectoren, während sie noch stille steht, und dreht man sie dann plötzlich, so sieht man bei dauerndem Fixiren das Nachbild in umgekehrter Färbung der Sectoren. Sowohl die Farben der Nachbilder, als auch die Contrastfarben faßt man unter dem Namen *subjective* Farben zusammen. Hering verwirft (1872) die „Täuschung des Urtheils" zur Erklärung des simultanen Contrastes und zeigt, daß benachbarte Netzhautstellen sowohl miterregt, als mitermüdet werden können. Für ersteres spricht der Versuch, daß ein negatives Nachbild auf einer hellen Fläche in den ersten Secunden dunkler wird, was gewiß keine Täuschung des Urtheils sein könne; für letzteres der Versuch, daß ein dunkler Rand einer hellen Fläche nur im ersten Augenblick dunkler aussehe, bei längerer Fixirung sich dagegen mit einem hellen Schein überziehe, der besonders im pos. Nachbild sehr entschieden auftrete. Durch diese zwei Grundgedanken erklärt Hering die Contrasterscheinungen und führt zur Erklärung jener an, daß die zelligen Theile der Netzhaut durch Fasern verknüpft seien.

Die Gesichtswahrnehmung. Jeden durch das offene Auge erhaltenen Eindruck auf die Netzhaut schreiben wir, durch tausendfältige Erfahrung belehrt, einer äußeren Lichtwirkung zu, wir projiciren die Netzhauteindrücke nach außen; da die gleichzeitigen Netzhauteindrücke neben einander liegen, so bilden auch die äußeren Projectionen ein flächenartiges Nebeneinander, das beim Sehen mit einem Auge wie die Netzhaut selbst, ungefähr die Form einer Kugelfläche bildet. Die Kugelfläche, die sich bei ruhigem geraden Sehen auf der Netzhaut eines Auges abbildet, nennt man das Sehfeld; dieses monoculare Sehfeld ist wohl zu unterscheiden von dem monocularen Blickfelde und dem monocularen Gesichtsfelde. Das monoculare Gesichtsfeld umfaßt den gesammten Raum, der mit Hilfe der Bewegungen eines Auges gesehen werden kann, und das monoculare Blickfeld den Raum, dessen sämmtliche Punkte durch ein bewegtes Auge fixirt werden können. Die Bewegungen eines Auges bestehen nur in Drehungen, da das Auge wegen vollständiger Ausfüllung der Augenhöhle sich nur sehr wenig in diese Höhle zurückziehen, und da es wegen der Muskeln und des Sehnerven nicht aus derselben treten kann. Die Drehungen geschehen um einen Punkt, welcher $13{,}6^{mm}$ hinter dem Scheitel der Hornhaut liegt. 350

Die Drehungen geschehen nach oben und unten, also um eine wagrechte von links nach rechts gehende Achse; diese mißt man durch den Erhebungswinkel; dann nach links und rechts, also um eine verticale Achse; diese werden durch den Seitenwendungswinkel gemessen; endlich um eine wagrechte von vorn nach hinten gehende Achse; man nennt dieselben Raddrehungen, weil sich hierbei die Iris wie ein Rad dreht. Eine Raddrehung findet nicht statt, wenn nur die erste oder nur die zweite Drehung vorgenommen wird; geschehen aber diese beiden Drehungen, so ist auch eine Raddrehung vorhanden. Die Raddrehung ist also eine Function der Erhebung und der Seitenwendung (Donders 1846). Die Art dieser Function gibt Listings (1857) Raddrehungsgesetz: die Raddrehung ist so groß, als wäre der Augapfel um eine feste Achse gedreht worden, die zur ersten und zweiten Richtung der Fixationslinie (Blicklinie) senkrecht steht; hieraus ergibt sich eine Formel, welche die Größe der Raddrehung aus dem Erhebungs- und dem Seitenwendungswinkel zu berechnen erlaubt; sind beide z. B. 5°, so ist die Raddrehung nur 13′, sind beide 40°, so ist sie 15°; sie wächst mit beiden. Dieser Zusammenhang ist eine Folge des instinctiven Bestrebens, die leichteste Orientirung zu ermöglichen, und kann aus diesem Princip mathemathisch abgeleitet und durch Beobachtung an Nachbildern experimentell bestätigt werden (Helmholtz 1863). Die Augenstellung ohne Drehung heißt Primärstellung, die Stellung nach einer Drehung um die erste oder zweite Achse Secundärstellung, die nach einer Drehung um eine beliebige aus den 3 Richtungen componirte Achse Tertiärstellung.

Anordnung und Ausmessung im monocularen Gesichtsfelde (Wundt 1862). 351 Nach dem Gesetze der specifischen Sinnes-Energieen bringt jede Reizung der Netzhaut einen Lichteindruck hervor; so haben wir auch bei geschlossenen Augen durch das innere Leben des Auges eine Lichtwirkung auf alle Theile der Netzhaut und nehmen dieselbe wahr als ein dunkles, kegelförmiges Gesichtsfeld. Blindgeborene, später Operirte haben zuerst eine allgemeine Lichtempfindung, dann unterscheiden sie Helligkeiten, und später erst unterscheiden sie Gegenstände, Maße und Richtungen. So setzt sich auch unsere Gesichtswahrnehmung aus unendlich vielen Erfahrungen der jüngsten Kindeszeit zusammen; mit den hierdurch erworbenen Fähigkeiten verfahren wir

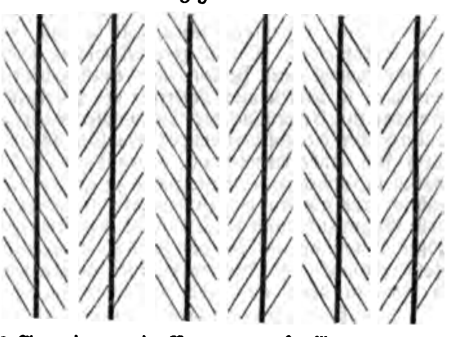
später unbewußt im gewöhnlichen Sehen, wie ein Maler die in reiferem Alter, also bei vollem Bewußtsein, erlernten höheren Sehfähigkeiten später ebenfalls unbewußt immer verwendet. Nach den Gesetzen der Lichtbrechung entsteht das Bild eines äußeren Lichtpunktes an der Stelle der Netzhaut, wo ein von dem Punkte durch den Knoten gezogener Strahl die Netzhaut trifft; wir haben dies unzählige Mal erfahren, und versetzen daher später den Gegenstand unbewußt an die Stelle des dunklen Gesichtsfeldes, wo eine vom Netzhautbilde durch den Knoten gezogene Grade eintrifft; hieraus folgt einfach, daß hoch liegende Netzhautbilder uns tiefliegende äußere Gegenstände, tiefliegende Netzhautbilder hoch liegende Gegenstände zur Wahrnehmung bringen, woraus sich auch erklärt, daß die umgekehrten Netzhautbilder uns die Gegenstände aufrecht wahrnehmen lassen. So entsteht durch Erfahrung die Wahrnehmung der Anordnung der Gegenstände. Wie aber die Empfindung der verschiedenen Stellen der Netzhaut zu Stande kommt, ob wir durch das Nebeneinanderliegen der verschiedenen Netzhautelemente sie auch als nebeneinanderliegend empfinden, oder ob die verschiedene Vertheilung der Stäbchen und Zapfen an verschiedenen Netzhautstellen eine verschiedene Empfindung dieser Stellen verursacht und uns dadurch die Ausdehnung des Gesichtsfeldes zum Bewußtsein bringt, oder ob die verschiedene Muskelanstrengung, welche nöthig ist, um die verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes mit dem gelben Fleck zu fixiren, uns die Vorstellung der verschiedenen Netzhautstellen hervorruft, ist noch nicht bestimmt erforscht. Bei den genauen Ausmessungen im Blickfelde spielt das Gefühl der Muskelanstrengungen jedenfalls eine Hauptrolle. Wir beurtheilen die Entfernung zweier Lichtpunkte durch das Gefühl der Muskelarbeit, welche nöthig ist, um das Bild des einen Punktes auf der Netzhautgrube durch das Bild des anderen auf derselben Stelle zu ersetzen; wir durchlaufen dann mit dem Blicke die Entfernung der beiden Punkte; aber auch wenn wir dies nicht thun, wenn der eine Punkt fest auf der Netzhautgrube und der andere auf einer anderen Stelle der Netzhaut abgebildet bleibt, so haben wir durch Erfahrung das Gefühl für die Muskelarbeit, die zum Durchlaufen der Entfernung nöthig wäre, und erhalten dadurch ein allerdings ungenaues Maß der Entfernung. Auf diese Weise setzt sich die Wahrnehmung der Größe der Gegenstände zusammen.

Im indirecten Sehen kann das Augenmaß nur sehr ungenau sein; nur solche gleiche Linien und Winkel werden gut als gleich erkannt, welche einander parallel sind und daher durch Augenbewegung rasch zum Decken mit ihren Nachbildern gebracht werden können. Auch beim directen Sehen, d. i. beim Durchlaufen mit fixirendem Blicke hilft dieses Decken einer Linie mit dem Nachbilde einer parallelen, gleichen Linie die Genauigkeit des Augenmaßes verstärken, doch bringt man es nur durch Zufall dahin, zwei Entfernungen oder Linien einander absolut gleich zu machen; die Fehler betrugen bei Fechner durchschnittlich $^1/_{60}$ und bei Volkmann $^1/_{50}$—$^1/_{100}$ und zwar bei den verschiedensten Längen, wodurch sich auch hier das psychophysische Gesetz bestätigt. Die Vergleichung verticaler Linien ist ungenauer als die von horizontalen, und noch viel ungenauer ist die Vergleichnng von Linien verschiedener Richtung, weil hier das Decken mit dem Nachbilde unmöglich und die Muskelarbeit nach verschiedenen Richtungen verschieden ist. Besonders auffallend ist der große Unterschied zwischen verticalen und horizontalen Linien; verticale erscheinen um $^1/_5$—$^1/_{30}$ höher als gleich lange horizontale, ein Quadrat erscheint höher als breit. Auch in der Beurtheilung der Krümmung treten Täuschungen ein; gerade, wagrechte und senkrechte Linien erscheinen uns nur in der Primärstellung des Auges, d. i. in derjenigen Stellung, in welcher weder Erhebung, noch Wendung eine Raddrehung bewirkt, als gerade; in jeder anderen Lage, die ersteren bei höherer oder tieferer, die letzteren bei seitlicher Lage, erscheinen sie uns nach der Mittellage zu concav gekrümmt, was sich einfach daraus erklärt, daß das Auge beim Durchlaufen einer solchen Linie eine Raddrehung machen muß; doch findet diese Erscheinung auch im indirecten Sehen statt; zeichnet man umgekehrt convex nach einer Mittellinie in demselben Maße gekrümmte Linien, wie die geraden concav erscheinen, so sehen die convexen Linien beim Fixiren der Mittellinie gerade aus. Nur solche Linien, die durch den Blickpunkt des Auges in der Primärstellung, den sogenannten Hauptblickpunkt gehen, die also in Meridiane des Auges fallen, erscheinen auf kurze Strecken als gerade Linien; sie

sind daher Richtlinien für das Auge, weil sie beim Durchlaufen mit dem Blicke gerade aussehen und in sich selbst verschieblich sind nach Listings Drehungsgesetz.

352 Aehnliche **optische Täuschungen** beruhen auf der bei allen Wahrnehmungen geltenden Regel, daß deutlich erkennbare Unterschiede größer erscheinen als undeutlich zu erkennende Unterschiede von gleicher objectiver Größe. Eine durch Striche getheilte Strecke sieht größer aus als eine in derselben Richtung befindliche ungetheilte Strecke von gleicher Länge; ein Quadrat, das durch Parallele zur Basis getheilt ist, erscheint höher als breit, ein anderes, das durch Senkrechte zur Basis getheilt ist, breiter als hoch; getheilte und ungetheilte rechte Winkel neben einander erscheinen ungleich, die ersteren stumpf, die letzteren spitz; ein leeres Zimmer sieht kleiner aus als ein möblirtes, Damenkleider mit Querstreifen lassen die Figur schlanker erscheinen, wir halten die Cylinderhüte für höher als breit; eine nach dem Augenmaße gefertigte Zeichnung einer unregelmäßigen Meeresküste enthält die wagrechten Linien in dem richtigen Verhältnisse, die verticalen aber doppelt so groß. Geht eine schiefe Linie hinter einem undurchsichtigen Streifen her, so halten wir ihre diesseitige Hälfte nicht für ihre Verlängerung, sondern eine etwas niedriger liegende Parallele. Parallele Linien, welche außerhalb mit Strichen versehen sind, die von der Mitte aus divergiren, erscheinen convergent, im entgegengesetzten Falle divergent (Hering). Sind verticale parallele Streifen von kurzen, schrägen, parallelen Strichen durchschnitten, so weichen sie immer in entgegengesetzter Richtung von der Verticalen ab, wie diese Striche (Fig. 224). Von zwei sectorförmigen congruenten Stücken eines Papierringes scheint uns immer dasjenige Stück als größer, das mit seinem größeren Bogen den kleineren des anderen berührt. Eine ähnliche optische Täuschung durch unser Urtheil ist die Ausfüllung des blinden Flecks. Wäre das Auge immer in Bewegung, so könnte man an die Ersetzung des mangelnden Eindruckes durch andere Netzhautstellen denken; da er aber auch bei fixirtem Blicke ausgefüllt ist, z. B. in unserer Fig. 219 mit dem schwarzen Papiergrunde, so muß angenommen werden, daß abgesehen vom binocularen Sehen unser Urtheil die Ausfüllung nach der Wahrscheinlichkeit vornimmt; eine Empfindung von Dunkelheit ist an dieser Stelle nicht möglich, weil ihr jede Lichtempfindungsfähigkeit abgeht.

Fig. 224.



Auch die Wahrnehmung der Bewegung gibt zu optischen Täuschungen Veranlassung. Wir nehmen eine Bewegung dadurch wahr, daß ein Netzhautbild seine Lage zu den übrigen ändert; dies kann aber auch dadurch geschehen, daß die Netzhaut mit einer Anzahl von Bildern sich bewegt, während andere ihre Lage behalten; daher sehen wir ruhende Gegenstände bewegt, wenn wir uns selbst unbewußt bewegen, oder wir glauben uns zu bewegen, während wir in Ruhe sind und sich etwas Fixirtes bewegt. Wenn wir uns selbst bewegen, so schreiten die Bilder naher Gegenstände rasch über die Netzhaut weg, die entfernterer dagegen langsam; wir halten daher die letzteren oft für ruhend, ja sogar in entgegengesetzter Bewegung begriffen; der Thompson'sche Wirbel (Fig. 223). Fixiren wir rasch sich bewegende Gegenstände, so gewöhnt sich die ganze Muskulatur des Auges sogleich an die Bewegung und setzt dieselbe auch noch fort, wenn man das Auge auf ruhende Gegenstände richtet; diese scheinen dann rasch in entgegengesetzter Richtung zu gehen. Hierdurch erklärt sich der Gesichtsschwindel; ist man in diesem begriffen, so sucht man instinctiv seine Stellung den scheinbar bewegten Gegenständen anzupassen, wodurch man das Gleichgewicht verliert. Auf Schiffen scheint dem Neuling die Cardani'sche Lampe zu schwanken; hat er sich aber daran gewöhnt, sich nach der Schwere zu orientiren, so erscheint ihm die Lampe ruhig, die Cajüte aber schwankend. — Wenn ein Auge seine Richtung oder Radbrehung ändert, so thut es auch das andere, selbst wenn das erste geschlossen ist: sieht man ins Unendliche, schließt dann ein Auge und fixirt mit dem anderen einen in der ursprünglichen Richtung desselben liegenden Gegenstand, so erscheint derselbe nach der Seite verschoben, weil auch das geschlossene Auge an der Fixation theilnimmt und dadurch seine Richtung ändert, was wiederum von dem offenen Auge mitgemacht wird. Hieraus hat Hering (1861) geschlossen, daß wir die Punkte des Netzhautbildes so nach außen projiciren, als ob dasselbe in einem Cyclopenauge auf der Nasenwurzel sich befände.

353 **Die Entfernung der Gegenstände vom Auge** (Wheatstone 1833). Wir nehmen die Entfernung der Gegenstände von uns wahr 1) durch das Gefühl der noth=

wendigen Accomodationsanstrengung, 2) durch die Beobachtung mit bewegtem Kopf und Körper und 3) durch den gleichzeitigen Gebrauch der beiden Augen.

Außer diesen die Wahrnehmung der Tiefendimensionen ermöglichenden Hilfsmitteln gibt es noch andere, welche uns die Vorstellung derselben vermitteln; dahin gehört der Gesichtswinkel oder die Größe, in der uns bekannte Körper, Menschen, Hausthiere, Bäume, Häuser erscheinen; je kleiner dieselben aussehen, desto weiter sind sie entfernt. Hiermit hängt zusammen, daß Gegenstände von bekannter Entfernung, wenn wir sie wegen trüber Luft, wegen verwischten Umrissen u. s. w. für ferne halten, wie im Nebel schwimmende Gebäude, uns größer vorkommen. Kinder, denen die Beziehung zwischen Entfernung und Größe noch nicht geläufig ist, halten entfernte Menschen für Püppchen, besonders beim Sehen nach oben und unten, wo wir die Entfernungen leicht kleiner wahrnehmen als bei der gewöhnlichen wagrechten Sehrichtung. Ein weiteres Mittel, Entfernungen vorzustellen, liegt darin, daß Körper von bekannter Form von anderen verdeckt erscheinen und daher nothwendig hinter diesen liegen; auch die perspectivische Gestalt von Körpern, besonders von einfach und scharf begrenzten, befähigt uns, ihre Tiefendimensionen wahrzunehmen; während Kinder einen durch Linien perspectivisch gezeichneten Würfel, Kegel, Pyramide als flache, bedeutungslose Linienform sehen, hält es uns schwer, uns von der Vorstellung der Körperform loszumachen. Oft ist aber bei solchen Zeichnungen eine doppelte Täuschung möglich; sie kann sowohl einen hohlen, wie einen erhabenen Körper nach Belieben des Beschauers vorstellen; so können auch Matrizen als Patrizen erscheinen und umgekehrt. — Ein weiteres Moment zur Erkennung der Tiefendimensionen geben die Schlag- und Eigenschatten, besonders aber die Luftperspective; ein Gegenstand erscheint uns ferner, wenn seine Umrisse durch das trübe Luftmedium verwaschen, seine Farbe bläulich angehaucht erscheint; wir schätzen in Gebirgen die Entfernung zu gering, weil die Luft dort reiner ist. Der Himmel erscheint uns als ein plattes Gewölbe, einerseits weil zwischen uns und dem Horizont zahlreiche Gegenstände und trübe Luft sich befinden, wodurch uns die Entfernung des Horizontes größer vorkommt als die des Zenits, andererseits weil wir die offenbar platte Form des Wolkenhimmels auf den ungetrübten übertragen. So erscheinen uns Sonne und Mond im Horizont ferner und daher größer als in der Himmelshöhe.

Die Abschätzung der Entfernung eines Gegenstandes nach der Accommodationsanstrengung ist sehr ungenau; es ist nach Wundt wohl möglich, das Annähern eines Körpers hierdurch zu beobachten; schwieriger ist schon das Entfernen zu erkennen, und ganz unmöglich ist die Angabe der Distanz. Das genaueste Mittel zur Wahrnehmung der Entfernung ist die Vergleichung der zwei perspectivischen Bilder eines Gegenstandes von verschiedenen Standpunkten; dasselbe kann beim monocularen Sehen durch Bewegungen des Kopfes und des Körpers stattfinden, wird aber beim binocularen Sehen einfach dadurch bewerkstelligt, daß jedes Auge eine andere perspectivische Ansicht der Gegenstände, ein anderes Blick- und Sehfeld hat. Im ersten Falle wird das zweite Bild in der Erinnerung mit dem ersteren verglichen, im zweiten Falle dagegen vergleicht man zwei gleichzeitig sichtbare Bilder; daher ist für Einäugige eine richtige Beurtheilung der Tiefen- und Entfernungsverhältnisse, also auch der Körperlichkeit viel schwieriger und unvollkommener als beim Sehen mit zwei Augen. Je weiter übrigens Gegenstände entfernt sind, desto ähnlicher werden ihre 2 Netzhautbilder; dies gibt uns dann wohl ein Mittel, ihre absolute Entfernung zu beurtheilen, macht uns aber die Wahrnehmung der Tiefendimensionen weniger möglich; sehr entfernte Gegenstände erscheinen uns flächenhaft.

Wenn wir an Gegenständen vorbeigehen, so haben wir natürlich durch unsere Bewegung eine directe Wahrnehmung ihrer Entfernung von unserem Ausgangspunkte und ihrer Tiefendimensionen. Wenn wir unsere Stellung gegen nahe Körper verändern, so erhalten wir durch die Verbindung unserer eigenen Bewegung mit der wahrgenommenen Veränderung des Körperbildes ebenfalls ein Urtheil über die Entfernung; ebenso bildet sich das Urtheil, wenn wir nur unseren Kopf bewegen, oder wenn wir die 2 Netzhautbilder vergleichen. In den letzten Fällen läßt sich die Erscheinung mit der geometrischen Bildconstruction eines Punktes durch Sehen mit 2 Augen vergleichen. Jedes Netzhautbild ruft in uns die Empfindung der Richtung hervor, in der sich ein Punkt befindet; die beiden Netzhautbilder wirken daher so, daß uns der Punkt in dem Schnitte der zwei verschiedenen Richtungen erscheint, in denen die beiden Augen den Punkt sehen. Diese Erklärung ist übrigens nur eine Veranschaulichung des Herganges, da das Auge die zwei Richtungen nicht als wirklich gezogene Linien sieht und daher auch ihren Schnittpunkt nicht fixiren kann; der Vorgang

elbst ist die Vergleichung der 2 verschiedenen Netzhautbilder und ein daraus durch die Mittel er Erfahrung geschöpftes Urtheil über die Entfernung. Deßhalb sind auch hier leicht Täuschungen möglich; ja die genaue Schätzung von Entfernungen gehört zu den schwierigsten lugenwerken und geschieht selten ohne Fehler; die hierbei wirksame Empfindung wird wohl as Gefühl für den Grad der Convergenz sein, den unsere Blicklinien bei der Fixation des egenstandes annehmen müssen.

354 **Das Stereoskop** (Wheatstone 1833, Brewster 1843). Der sicherste Nachweis, daß das lbschätzen der Entfernungen und Tiefendimensionen, das körperliche Sehen, durch Verbinung der beiden Netzhautbilder stattfindet, wird durch das Stereoskop geliefert. In seiner infachsten Form besteht dasselbe aus den 2 Bildern eines Gegenstandes, wie derselbe von en beiden Augen wahrgenommen wird, wie z. B. Fig. 225 die Ansichten eines Würfels urch die beiden Augen darstellt. Bieten wir dem Gesichte gleichzeitig diese beiden Bilder ar, jedem Auge das zugehörige Bild, so erscheint ns der Gegenstand einfach und körperlich, stereoskoisch (στέρεος, körperlich); denn wir versetzen dann eden Punkt in den Schnittpunkt der Blicklinien der Augen, d. h. dahin, wo er am Gegenstande in Wirklichkeit ist. Die 2 Bilder müssen bei einem Versuche in die richtige Lage gegen die beiden Augen ebracht werden, d. i. diejenige, in welcher die Bilder ines unendlich entfernten Punktes beiden Augen in leicher Richtung erscheinen. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß man die beiden Bilder n einer Entf. neben einander legt, die gleich dem Abstande der beiden Augenknoten ist, und ie dann mit parallel gerichteten Gesichtslinien betrachtet, d. h. also für die Entf. der Biler accommodirt. Da diese Augenstellung schwierig ist, und da man außerdem mit jedem luge 2 Bilder sieht, so gelingt dieser einfachste Versuch nur nach vielfacher Uebung; etwas chneller erreicht man das Ziel, wenn man zwischen jedes Auge und das zugehörige Bild ine geschwärzte Röhre bringt, oder wenn man zwischen der Bildermitte und die Nase eine eschwärzte Wand stellt. Man kann auch dadurch ohne Apparat stereoskopisch sehen, daß nan die Bilder verwechselt und dann mit dem rechten Auge nach dem linken Bilde und mgekehrt sieht, wodurch der Gegenstand an dem Kreuzungspunkte der Blicklinien stereoskoisch auftritt. Alle diese Mühen aber fallen weg bei dem Spiegelstereoskop von Wheatstone nd dem Prismenstereoskop von Brewster. In dem ersteren sind 2 Spiegel unter 90° gegen inander und unter 45° gegen den Boden des Kastens aufgestellt, an dessen senkrechte Seitenwände die 2 Bilder gestellt werden. Man bringt den Nasenrücken an die Spiegelkante, so ieht man mit jedem Auge in einem Spiegel ein Bild. Das viel bekanntere Prismentereoskop enthält für jedes Auge ein Prisma mit convexen Flächen, also Linsenhälften, die nit ihren brechenden Kanten gegen einander gewendet sind (a und b in Fig. 226. Mittels er Brechung durch Prismen werden die beiden Bilder u′ und u″ mehr der brechenden Kante genähert und erscheinen daher vereinigt n u, wo die Augen den Gegenstand körperch erblicken. Dieses Stereoskop ist compenidser als das von Wheatstone, läßt eine leichmäßigere Beleuchtung zu und bringtween der Lupenform der Gläser eine Vergrößerung hervor; außerdem gestattet es die Anendung der Glasphotographien und hat danrch ein hohes Interesse für Kosmoramen nd dgl. gewonnen. Steinhäuser hat (1870) ie „geom. Constr. der Stereoskopbilder" gehrt und (1877) deren math. Beziehungen ntersucht: die Bilder sind centrale Projecionen eines Gegenstandes auf einer Bildebene von den beiden Augen als Centren; für die ewöhnlichen Stereoskopbilder liegt die Bildebene zwischen den Augen und dem Objecte; egt aber die Bildebene jenseits des Objectes, so liegt das Rechtsaugenbild links und umekehrt. Der Kasten ist dann viel länger als gewöhnlich, ist stark eingeschnürt und enthält ne Zwischenwand, damit jedes Auge nur das zugehörige Bild sehen kann. Endlich müssen e Prismen wegen der großen Entf. der Bilder halbe concave Linsen sein; diese Stereoskope aben den Vorzug, daß viele Zuschauer gleichzeitig die „stereoskopischen Wandtafelbilder" rperlich sehen können. — Sind zwei Bilder absolut einander gleich, so erscheinen sie auch n Stereoskop nur als ein Bild, unkörperlich, flächenhaft. Sind sie dagegen in Kleinigiten der Stellung verschieden, so müssen die Augen Bewegungen machen, um die verschieenen Bildstellen zu vereinigen, wodurch sich die Richtung der Sehstrahlen und dadurch der

Fig. 225.

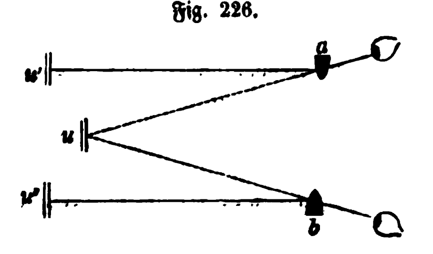


Fig. 226.

Schnittpunkt derselben verändert, bald vor, bald hinter die Bildfläche fällt; es tritt dann ein stereoskopisches Bild auf. Man benutzt dies zur Unterscheidung des ächten von falschem Papiergeld, zweier Auflagen desselben Druckwerkes u. dgl. (Dove 1859). Verwechselt man die Bilder eines Stereoskops, so erscheinen auch die Erhabenheiten und Vertiefungen, Hautrelief und Basrelief u. s. w. vertauscht; dasselbe wird durch Wheatstones Pseudoskop (1852) (ψευδω, täuschen) bewirkt, in welchem die Strahlen eines Objectes durch Reflexion an den Hypotenusenflächen zweier rechtwinkeligen Prismen vertauscht werden. — Um auch ferne Gegenstände nicht flächenhaft, sondern körperlich sehen zu können, dient das Telestereoskop (Helmholtz 1857); es ist ein Spiegelstereoskop, welches statt der Bilder noch zwei den inneren Spiegeln parallele nach dem Horizont gewendete Spiegel enthält; hierdurch entstehen zwei mehr von einander entfernte Bilder des Horizontes, die durch die inneren Spiegel in beiden Augen stereoskopisch vereinigt werden.

355 **Das binoculare Sehen** (Hering 1864, Helmholtz 1864). Das Sehen mit zwei Augen hat vor dem monocularen Sehen den Vorzug, daß Unrichtigkeiten eines Auges durch das andere corrigirt werden, daß die Gegenstände nicht flächenhaft, sondern körperlich erscheinen, und daß eine genauere Schätzung der Größe und Entfernung der Körper möglich wird. Wir sehen trotz der zwei Augenbilder nur einfach, weil überhaupt jede Sinneswahrnehmung, die aus mehreren Empfindungen zusammengesetzt ist, aber von einer einheitlichen äußeren Ursache herrührt, durch allmälige Erlernung sich in Uebereinstimmung mit der Ursache setzt, also einheitlich wird. Indessen sehen wir trotz dieses einheitlichen Eindruckes einen großen Theil des Gesichtsfeldes doppelt, d. h. einen und denselben Gegenstand durch jedes Auge an einer anderen Stelle, wie man leicht durch abwechselndes Betrachten eines Gegenstandes auf einem und demselben Hintergrunde bald mit dem einen, bald mit dem anderen Auge erfahren kann. Es ergibt sich dann, daß wir alle Punkte doppelt sehen, die in den Sehfeldern beider Augen eine verschiedene Lage zum Blickpunkte haben, dagegen diejenigen einfach d. h. im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde sich deckend, die eine gleiche Lage zum Blickpunkte haben, deren Netzhautbilder also gegen den gelben Fleck gleich liegen. Zu diesen sich deckenden oder auch identischen Punkten gehören die beiden Blickpunkte, die Punkte der beiden Netzhauthorizonte, welche gleichweit vom Bildpunkte abstehen, die Punkte der scheinbar verticalen Meridiane, die gleichweit vom Netzhauthorizonte entfernt sind, und alle diejenigen Punkte, welche gleiche und gleich gerichtete Abstände von diesen Linien besitzen. Diese Punkte bilden sich auf solchen Netzhautstellen ab, die in beiden Augen eine identische Lage gegen den gelben Fleck haben, und die man deßhalb identische Punkte, correspondirende oder Deckstellen der beiden Netzhäute nennt; es sind alle Punkte der Netzhäute, auf denen die Netzhautbilder eines und desselben Sternes entstehen. Den Inbegriff aller Punkte des äußeren Raumes, welche sich auf identischen Netzhautstellen abbilden und daher einfach gesehen werden, nennt man den Horopter. Derselbe ist im Allgemeinen eine Curve doppelter Krümmung, welche als Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades angesehen werden kann.

Betrachtet man mit einem Auge einen Gegenstand auf einem Hintergrunde, so erscheint er wie ein Schemen auf dessen Fläche, und eine Beurtheilung der Entf. wird unmöglich; öffnet man aber das andere Auge, so springt der Körper plötzlich vom Hintergrunde ab. — Hält man zwei Finger hinter einander, so sieht man beim Fixiren des einen den anderen doppelt. — Fixirt man einen Lampencylinder auf einem gestickten Vorhange als Hintergrund, so rückt die Stickerei beim Schließen des rechten Auges nach links, beim Schließen des linken Auges nach rechts. Fixirt man aber die Stickerei, so rückt der Cylinder beim Schließen des rechten Auges nach rechts und beim Schließen des linken Auges nach links; da nun beim Schließen eines Auges das Bild des anderen offenbar an derselben Stelle der Netzhaut dieses Auges steht wie beim Oeffnen beider Augen, so folgt, daß beim Fixiren des Cylinders zwei verschieden gelegene Bilder der Stickerei, beim Fixiren der Stickerei zwei verschiedene Bilder des Cylinders entstehen, daß man also trotz des Einfachsehens mit beiden Augen doppelt sieht; und zwar sind es die nicht fixirten Gegenstände, wärend der fixirte einfach gesehen wird. Durch ähnliche Versuche ergeben sich die übrigen obigen Sätze. Absolut genau gelten dieselben nicht wegen der nicht genau sphärischen Ge-

ıalt des Auges und wegen der schon früher besprochenen Abweichungen desselben; namentlich
ınd die verticalen Meridiane nicht genau identisch, sondern die identischen Linien weichen
twas von ihnen ab und zwar oben nach außen und unten nach innen, so daß also die
hysiologische Höhenachse des Auges etwas zu der geometrischen geneigt ist. — Die Con-
ruction und Berechnung des Horopters beruht darauf, daß die Richtungslinien, die von
wei identischen Netzhautpunkten ausgehen, sich in einem Horopterpunkte schneiden. Hieraus
rgeben sich die mathematischen Ableitungen der Horoptergleichungen; die von Helmholtz
eht davon aus, daß jeder Netzhautpunkt als Schnitt eines Meridians und eines Parallel-
reises, dessen Pol der gelbe Fleck ist, aufgefaßt werden kann; der andere von Helmholtz und
on Hering eingeschlagene Weg betrachtet einen Netzhautpunkt als bestimmt durch seinen
Erhebungswinkel und seinen Seitenwendungswinkel. Legt man nun durch Punkte von glei-
hen Erhebungswinkeln in beiden Augen Ebenen und sucht die Durchschnittslinie dieser Ebenen,
o ist der Inbegriff aller dieser Schnittlinien der „Horizontalhoropter"; analog ergibt sich
er „Verticalhoropter", dessen Schnitt mit dem Horizontalhoropter dann den Horopter für
en Punkt, von dessen Winkeln man ausgegangen ist, darstellt; so erhält man den „Punkt-
oropter" als Schnitt zweier „Linienhoropter". Von diesen Linienhoroptern ist noch von
Bedeutung der „Meridianhoropter", der bei der ersten Methode auftritt; dort legt man
ämlich die Hilfsebenen durch identische Meridiane und den Knotenpunkt; der Inbegriff der
Schnittlinien je zweier dieser Ebenen ist der Meridianhoropter oder die Normalfläche, welche
ie Eigenschaft hat, daß zwar nicht alle in ihr liegenden Punkte, aber wohl alle in ihr lie-
enden geraden Linien einfach erscheinen. Beide Methoden der Horopterbestimmungen sind
Probleme der höheren Mathematik. In einigen Fällen reicht einfache geometrische Betrach-
tung aus; z. B. in der Primärstellung und bei den Secundärstellungen mit parallelen und
vagrecht gerichteten Sehachsen ist der Horopter eine der wagrechten Visirebene parallele
Ebene, welche mit dem Fußboden zusammenfällt, was für unser gewöhnliches Sehen und
Gehen von großer Wichtigkeit ist; da nämlich die physiologischen Achsen sich etwa 5′ unter-
halb der Augen schneiden, und da in diesem Falle der Horopter durch diesen Schnittpunkt
geht, so fällt er in den Fußboden. Der Meridianhoropter ist für convergente Secundär-
stellungen eine auf der Visirebene im Blickpunkte senkrechte Ebene, woraus sich ergibt, daß
ede gerade Linie einfach erscheint, sobald ein Punkt derselben in Secundärstellungen fixirt
wird; in Tertiärstellungen erscheinen sie durch Verbindung der Doppelbilder gekrümmt, wie
z. B. die Strahlen eines Drahtsternes, dessen Mittelpunkt man in Tertiärstellungen fixirt. —
Da der Horopter für jede Augenstellung nur eine beschränkte Anzahl von Punkten umfaßt,
o ist die Zahl der Punkte des Gesichtsfeldes, die doppelt gesehen werden, sehr groß;
außerdem fallen wegen der Doppelbilder auf identische Netzhautstellen Bilder verschiedener
Objectpunkte; da nun die Eindrücke identischer Netzhautstellen sich zu vereinigen scheinen,
o müßte dadurch eine Unreinheit der Bilder entstehen, wenn nicht für eine Verschmelzung
er Doppelbilder gesorgt wäre. Diese wird dadurch befördert, daß der einheitliche Eindruck
er zwei Horopterbilder, zu denen gewöhnlich die auf dem gelben Fleck befindlichen Bilder
gehören, alle Nebeneindrücke bedeutend überwiegt; denn diese Bilder sind die genauesten, weil
e dem Fixationspunkte angehören, sie machen einen stärkeren Eindruck, weil stets zwei
Horopterpunkte zusammen wirken, und für sie ist das Auge mehr accommodirt, als für
die Doppelbilderpunkte, die besonders in größeren Entfernungen vom gelben Fleck sehr
ungenau sind und daher von der Aufmerksamkeit ausgeschlossen bleiben; überhaupt sind die
psychischen Einflüsse, die uns die Vorstellung von der Einheit des Objectes aufzwingen,
Veranlassung für uns, die Doppelbilder zu vernachlässigen; und wollen wir dieselben einmal
beachten, so lassen wir uns durch die leichte Beweglichkeit der Augen sofort zur Fixation
verleiten, wodurch die Verdoppelung schwindet.

356 **Wettstreit der Sehfelder** (Haldat 1806, Dove 1841). Sind die Sehfelder
der beiden Augen mit verschiedenartigen Formen, Farben, Helligkeiten erfüllt, die
keine Verschmelzung zu einer Einheit zulassen, so sieht man oft beide Bilder gleich-
zeitig und einander superponirt; oft überwiegt in einzelnen Theilen des Gesichts-
feldes das eine Bild, in anderen mehr das andere, und wohl kommt es auch vor,
daß an einer Stelle des Gesichtsfeldes ein Bild durch das andere verdrängt wird.
Man bezeichnet diese Erscheinung als Wettstreit der Sehfelder.

Zwei monoculare Bilder können nur dann zu einem binocularen verschmelzen, wenn
sie in Lage, Gestalt, Größe und Farbe übereinstimmen oder nur geringe Unterschiede dar-
bieten, weil nur dann in uns das Bewußtsein von der Einheit der Ursache der Bilder er-
weckt wird. Ein horizontaler und ein verticaler dunkler Streifen im binocularen Sehen
über einander gebracht, decken sich trotz völliger Congruenz in Form und Farbe nicht; sie
bilden ein schwarzes Kreuz, das an der quadratischen Deckstelle dunkel, an den Seiten der-
selben aber etwas hell erscheint; es machen sich also die Conturen beider Bilder sichtbar

und verdrängen den Eindruck des leeren Feldes. Dies weist darauf hin, daß wir zur Wahrnehmung der Formen den Blick über die Conturen laufen lassen, daß also bei dem Wettstreite die Aufmerksamkeit ins Spiel kommt. Noch deutlicher tritt dies durch Mischung von Linienbildern verschiedener Richtung hervor; man kann bald das eine, bald das andere Muster im binocularen Sehen wahrnehmen, je nachdem man die Aufmerksamkeit richtet, woraus Helmholtz abermals schließt, daß die Inhalte der zwei Sehfelder nicht durch organische Einrichtungen verschmolzen werden, sondern daß die Verschmelzung der Sehfelder in ein Bild ein psychischer Act ist. Helmholtz und Andere nehmen auch niemals Mischfarben wahr, wenn beiden Sehfeldern verschiedene Farben geboten werden, und erklären manchmal auftretende Farbenänderungen als Wirkungen des binocularen Contrastes oder als Täuschung, hervorgebracht durch Superposition verschiedener Farben. Dove, Regnault, Brücke u. A. dagegen finden, daß zwei verschiedene Farben den beiden Augen dargeboten sich im binocularen Sehfelde nach den Regeln der Farbenmischung vereinigen, daß z. B. complementäre Farben Weiß geben, wenn das Auge des gewohnten Herumschweifens, wodurch der Wettstreit entstehe, sich entledige und die zwei Farben fixire. Brücke brachte (1853) vor das eine Auge ein hochgelbes, vor das andere ein blaues Glas und fixirte mit beiden Augen einen Gegenstand; er sah denselben dann blaugrau wie durch eine Londonsmoke-Brille. Entscheidend in diesem Streite über den Wettstreit soll Doves Versuch sein, nach welchem zwei verschieden gefärbte Bilder im Stereoskop die Mischfarbe annehmen, bei complementären Farben also weiß aussehen. Es wird hieraus geschlossen, daß in den Augen die beiden Farben wirklich gemischt würden, daß die Verschmelzung der Augenbilder auf identischen Netzhautstellen ein organischer, nicht ein psychischer Vorgang, also angeboren und nicht angelernt sei (Nativistische Theorie im Gegensatze zur empiristischen). Diese organische Verschmelzung soll nach Einigen von der Kreuzung der Sehnerven (Chiasma nervorum opticorum) herrühren, an welcher Stelle je eine Hälfte des einen Nervenstammes mit einer Hälfte des anderen zu neuen Nervenstämmen zusammentrete. Helmholtz führt als Hauptgrund gegen diese Auffassung der Identität den Versuch Wheatstones an, nach welchem umgekehrt zur Stereoskopie, correspondirende Punkte auf zwei identischen Netzhautstellen auch getrennt empfunden werden können. Wir haben uns oben im Ganzen an Helmholtz' Erklärungen angeschlossen, bekennen aber offen, uns nicht für eine der beiden Theorien ausschließlich der anderen entscheiden zu können.

Nach Versuchen von Bezold (1874) rührt der Wettstreit der Sehfelder für verschiedene Farben davon her, daß die Brechung verschiedener Farbenstrahlen eine verschiedene ist, daß daher eine Farbe ein undeutliches Netzhautbild hervorbringt, wenn das Bild der anderen deutlich ist, und daß deßhalb endlich, wenn den Augen zwei Farben dargeboten werden, bald das eine, bald das andere Auge sich für die betreffende Farbe zu accommodiren sucht, durch welche Accommodationsschwankungen der Wettstreit entsteht. Beseitigte man diese Accommodationsschwankungen, so müßte nach dieser Erklärung der Wettstreit aufhören. Die Beseitigung ist nach Bezold zu erreichen, wenn man die höhere Farbe dem Auge soviel näher rückt, daß durch ihre stärkere Augenbrechung ihr Bild in derselben Entfernung entsteht, wie das Bild der niedrigeren Farbe durch ihre schwächere Augenbrechung, z. B. wenn man eine ultramarinblaue Fläche dem einen Auge 2—3cm näher bringt als eine carminrothe Fläche dem anderen Auge. Ist auf diese Weise der Wettstreit beseitigt, und entfernt man sich nun bei festgehaltener Accommodation so weit, daß verschiedene Doppelbilder entstehen, so verschmelzen die mittleren, wo sie sich decken, zu der Mischfarbe. Diese binoculare Farbenmischung führt zu denselben Ergebnissen wie die Mischung auf dem Farbenkreisel. Ob durch diese neuen Versuche die Streitfrage über den Wettstreit vollständig entschieden ist, muß noch dahin gestellt bleiben.

Dove entdeckte (1850), daß zwei Bilder von verschiedener Helligkeit und verschiedener Farbe im Stereoskop mit Glanz erscheinen, daß dagegen bei gleicher Helligkeit und gleicher Farbe das stereoskopische Gesammtbild matt sei. Ein schwarzes und ein weißes Papierblatt, oder ein weißes Blatt mit schwarzen Strichen und ein schwarzes mit weißen Strichen geben im Stereoskop ein graphitglänzendes Bild. Oppel (1854) erklärt diesen und überhaupt jeden Glanz als das Resultat geringer Verschiedenheit der 2 Netzhautbilder; ein Körper glänzt nur, wenn er eine glatte Oberfläche oder glatte Oberflächentheilchen hat; solche glatte Oberflächen reflectiren das Licht aber nur nach einer Richtung; fällt dieselbe in das eine Auge, so trifft sie das andere nicht oder nur wenig; diese Verschiedenheit bilde das Eigenthümliche des Glanzes; wenn man demnach ein Gesammtbild aus zwei etwas verschieden hellen Bildern erzeuge, so müsse dasselbe ebenfalls Glanz haben.

Wenn man nach Dove im Stereoskop zwei verschiedene Farben in gleicher Entfernung anbringt, so muß das eine Auge eine etwas andere Accommodation vornehmen als das andere; es erscheint dann die eine Farbe so, als ob sie etwas weiter entfernt wäre wie die andere, und das Gesammtbild erhält hierdurch Glanz. So entsteht auch der farbige Glanz durch Verbindung des an der glatten Oberfläche reflectirten Tageslichtes mit dem aus der

Tiefe reflectirten Farbenlichte. Die Metalle haben bekanntlich Oberflächenfarben, womit hre hohen Brechungsexponenten, ihre starke Reflexion, Undurchsichtigkeit und anomale Dis- ersion zusammenstimmen. Ein Beispiel dafür, daß die Metalle eine der anomalen Dispersion ntsprechende auswählende Absorption besitzen, gibt die grüne Farbe dünner Goldplättchen m durchgelassenen Lichte. Durch die Vereinigung der Oberflächenfarbe der Metalle mit dem us einiger Tiefe reflectirten Lichte entsteht der Metallglanz. Davon überzeugt das Beispiel des Indigo; das aus der Tiefe reflectirte Licht ist blau; bringt man zu demselben och eine Oberflächenfarbe, indem man die Oberfläche glatt reibt, so entsteht der Kupferglanz es Indigo. Auch das Stereoskop bestätigt jene Erklärung; betrachtet man die 2 erwähnten estrichelten Papierblätter im Stereoskop durch ein rothes Glas, so entsteht Kupferglanz; elbe und blaue Einlagen durch ein violettes Glas gesehen glänzen metallisch. Die Metalle ind auch noch ausgezeichnet durch die elliptische Polarisation (383.).

Mängel der Augen. Außer den schon erwähnten Augenfehlern der Brachymetropie, 357 Presbyopie, Hypermetropie und des Astigmatismus gibt es noch mehrere Augenmängel; ie gewöhnlichsten sind: 1) das Schielen, eine Divergenz der Augenachsen, hervorgebracht urch ungleiche Anheftung zweier zusammengehörigen Muskeln, durch mangelhafte Functio- irung eines Augenmuskels, durch gestörte Innervation derselben u. s. w.; das Schielen st manchmal heilbar durch Einschneiden eines Augenmuskels. 2) Der graue Staar, eine Trübung der brechenden Medien, insbesondere der Krystalllinse, und in diesem Falle durch Herausnehmen derselben heilbar. Manchmal ist auch die Hornhaut bis zur Undurchsichtig- eit getrübt, eine unheilbare Blindheit. 3) Der schwarze Staar, eine Aufhebung des Per- eptionsvermögens entweder in der Netzhaut selbst oder im Sehnerven oder in dem Theile es Gehirns, dem der Lichtreiz zugeführt werden soll, eine unheilbare Blindheit. 4) Der rüne Staar oder das Glaukom (weil der Augenhintergrund durch die starre, vergrößerte Pupille grün erscheint) ist eine abnorme Steigerung des intraokularen Drucks, wodurch der Augapfel bis zur Steinhärte fest werden kann und die Sehnerven durch Atrophie zerstört verden; er ist nach Gräfe durch Iridektomie, Ausschneiden ein Stückes der Iris in wenig vor- erückten Stadien der Krankheit heilbar. 5) Die Farbenblindheit ist die Eigenschaft, ine der drei Young'schen Grundfarben oder zwei derselben nicht wahrnehmen zu können, vas auf der Unempfindlichkeit einer oder zwei der Young'schen Fasern beruhen mag. Prof. Delboeuf in Lüttich, der selbst rothblind ist, hält (1878) diese Krankheit für eine übermäßige Empfindlichkeit der grünen Fasern und daher für heilbar; beim Sehen durch Fuchsinlösung, ie Grün absorbirt, schien ihm sein Uebel vermindert. Man unterscheidet nach Youngs Theorie Rothblindheit (der häufigste Fall), Grünblindheit und Violettblindheit (der seltenste Fall). Dem Rothblinden erscheint Roth wie Schwarz, die helleren Rothstufen blaugrün, Blaugrün und Weiß sind für ihn gleich oder höchstens in der Helligkeit verschieden; er sieht igentlich nur Grün und Violett und deren Uebergangstöne in verschiedenen Helligkeitsstufen. Gelb erscheint ihm wie Grün, aber er unterscheidet doch Gelb von Grün, weil sie einen Unterschied in der Helligkeit haben, ja er spricht sogar viel von Gelb, weil er doch Unter- chiede im Grün merkt und diese sein Interesse erwecken. Der Grünblinde sieht Grün und Schwarz gleich, helle Stufen von Grün nennt er Roth, verwechselt also beide wie der Roth- linde, nur daß diesem Roth wie Grün erscheint. Nur Roth und Blau nebst ihren Zwischen- tufen nimmt er wahr, Gelb erscheint ihm hellroth, Weiß und Rosa sind einander gleich, m Spectrum ist nur Roth und Blau, bei Grün steht ein grauer Streifen. Violettblind- heit oder gar Blindheit für zwei Farben sind nur sehr selten und nicht genau beobachtet worden; Violettblindheit kann künstlich durch Genuß von Santonin, dem Alkaloid des Ar- temisia-Extractes erzeugt werden. Die Farbenblindheit ist gewöhnlich angeboren und erb- ch und wird gewöhnlich erst spät und schwer erkannt; auch ist sie schon durch Augenan- trengung im Dämmerlicht entstanden. Wegen der Gefahren, welche die Farbenblindheit eim Beobachten farbiger Signale auf Eisenbahnen u. s. w. mit sich bringt, sind zahlreiche Methoden zur qualitativen und quantitativen Bestimmung des Farbensinus aufgestellt wor- en. Bruno Kolbe, der dieselben geprüft und in „Geometrische Darstellung der Farben- lindheit" (1881) zusammengestellt hat, erklärt bei Massenprüfungen Holmgrens farbige Wollfäden und Stillings isochromatische Tafeln für die geeignetsten Erkennungsmittel; den esten Schutz gegen Simulation biete eine Wiederholung der Prüfung nach wenigen Wochen.

Die optischen Kästen. Die Camera obscura (Porta 1658) und die 358 Photographie (Niepce 1824, Daguerre 1838, Talbot 1839). In der optischen Kammer (s. 283.) sind die Bilder nur bei kleiner Oeffnung scharf, werden aber dann wegen geringer Lichtmenge undeutlich; zur Beseitigung dieses Mißstandes setzte Porta in die Oeffnung eine biconvexe Linse, welche nach der zweiten Linsen- regel von entfernten Gegenständen auf der entgegengesetzten Seite reelle, verkleinerte, umgekehrte Bilder in der Nähe des Brennpunktes erzeugt. Ist daher eine solche Linse

in eine Wandöffnung eines, zur Absorption zerstreuten Lichtes inwendig geschwärzten, Kastens eingesetzt und befindet sich in der Nähe des Brennpunktes ein Schirm, eine matte Glastafel oder drgl., so entstehen auf derselben Bilder äußerer Gegenstände. Da nach den Linsengesetzen die Bildweite nach der Gegenstandsweite veränderlich ist, so ist die Dunkelkammer mit Ausziehvorrichtung sowohl für die Linse als auch für die Bildtafel versehen.

Man erhält hierdurch die Bilder auf einer senkrechten Wand; um sie auf der obern wagrechten Kastenwand zu erhalten, bringt man in der Kammer einen Spiegel unter 45° an, der die Strahlen nach oben reflectirt, wo sie sich auf einer matten Glastafel zu von außen sichtbaren Bildern vereinigen (Camera clara); um sie auf der unteren Wand zu erhalten, läßt man die vom Gegenstande kommenden wagrechten Strahlen durch einen solchen auf dem Kasten stehenden Spiegel in die Linse nach unten reflectiren; Spiegel und Linse können hier durch ein Prisma vertreten sein, dessen Hypotenuse eben und spiegelnd und dessen Katheten linsenartig gekrümmt sind. Auf der Spitze eines Zeltes angebracht geben Spiegel und Linse Bilder der Außendinge auf einem Tische im Zelte.

Die erste Einrichtung ist in der Photographie gebräuchlich, welche sich die Aufgabe stellt, das Bild der Dunkelkammer festzuhalten. Niepce benutzte dazu Asphalt, Daguerre eine jodirte Silberplatte (Daguerreotypie), Talbot mit Chlorsilber getränktes Papier (Talbotypie), Archer (1851) nach Grays Vorschlag eine Glastafel, die mit einer jodsilberdurchtränkten Collodiumschicht überzogen ist; die beiden letzten Methoden vereinigt bilden jetzt die Photographie. Eine Glasplatte wird mit Collodium begossen, das mit Alkohol gemischt ist und etwas Jodkalium enthält; diese Platte taucht man in einem dunkeln Raume in das Silberbad, d. i. in eine wässerige Lösung von Silbernitrat, wonach das Coll. mit Jodsilber durchsetzt ist. Dann wird die Tafel in die Camera obscura gebracht, die mittels eines Petzval'schen aplanatischen Objectives deutliche Bilder erzeugt; genau an der Bildstelle, die schon vorher festgestellt worden ist, wird die Tafel angebracht. An den hellen Stellen des Bildes wird durch das Licht das Jodsilber zersetzt; das Silber scheidet sich in unendlich feinem, schwarzem Pulver aus, wodurch die hellen Stellen geschwärzt werden, während die dunkeln hell bleiben. So entsteht das negative Bild. Indessen würde eine ausreichende Zersetzung lange Zeit beanspruchen; man benutzt daher die Thatsache, daß die vom Lichte nur eben getroffenen Stellen, wenn auch noch nicht zersetzt, doch leichter zersetzbar sind, und läßt die Glastafel nur für kurze Zeit in der Dunkelkammer, um dann durch Begießen mit Pyrogallussäure oder mit Ferrisulfat die Reduction zu vollenden und dadurch das Negativ hervorzurufen. Ist dies geschehen, so muß das Jodsilber der hellen Stellen entfernt werden, weil sonst am Tageslichte die ganze Tafel sich schwärzen würde; hierzu wird Natriumhyposulfit benutzt, welches das Jodsilber löst und dann durch Abwaschen mit Wasser entfernt wird; so ist das Negativ fixirt. Zur Darstellung des Positiv wird das Papier auf eine Kochsalzlösung gelegt, zwischen Fließpapier etwas getrocknet und dann mit derselben Seite auf Höllensteinlösung gebreitet, wodurch es mit Chlorsilber getränkt wird. Dieses Papier legt man nun auf das Negativ, darauf schwarzes Tuch und setzt diese Verbindung in einen Rahmen gefaßt so der Sonne aus, daß das Licht durch das Negativ dringen muß, um auf das Papier zu kommen. Die hellen Stellen des Negativ lassen das Licht durch, hinter ihnen wird daher das Chlorsilber zersetzt und das Papier geschwärzt. Das so erhaltene Positiv wird dann durch Natriumhyposulfit und Wasser fixirt. — Das Ideal der Photographie, die Photochromie, d. i. die Erzeugung von Bildern in natürlichen Farben ist Gegenstand mancher Versuche gewesen. Schon Seebeck und J. Herschel bemerkten die Färbung des Chlorsilbers durch farbiges Licht und Becquerel erzeugte zuerst ein Nachbild des Sonnenspectrums auf Silberplatten. Niepce und Poitevin folgten ihm, und Letzterem gelang es, auf Papier Photochromieen anzufertigen, welche indeß nicht lichtbeständig waren. Zenker zeigte auf der Naturforscherversammlung zu Frankfurt (1867) farbige Photographieen. Ducos de Hauron (1869) setzt Youngs Theorie von den drei Grundfarben gemäß farbige Bilder aus einem rothen, einem blauen und einem gelben durchsichtigen Bild auf Gelatine zusammen, wofür Husnik (1871) die Photolithographie benutzt. Praktisch ist die Methode für Porträts noch nicht, weil die Entstehung der farbigen Negative zu viel Zeit erfordert. — Die Photographie wird in der Meteorographie zur selbstthätigen Aufzeichnung des Thermometer- und Barometerganges, der Magnetnadelschwankungen u. s. w. benutzt.

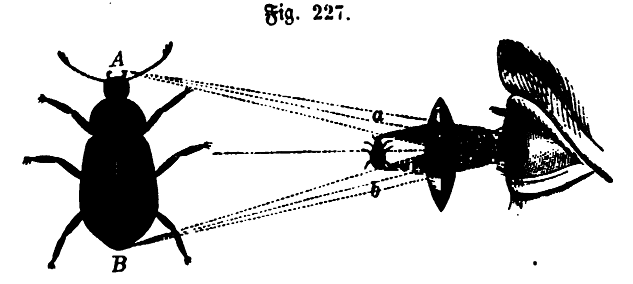
359 Das **Grimaskiskop** von Mauvillin (1866) erzeugt Zerrbilder von Photographieen u. drgl., indem die Linse mit feinen, ungleichen Streifen und anderen Unregelmäßigkeiten versehen worden ist. -- Die Zauberlaterne oder Laterna magica von Kircher (1645) benutzt die vierte Linsenregel, daß eine Sammellinse von nahe am Brennpunkte gelegenen Gegenständen in größerer Entfernung ein umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild erzeugt. Das directe und von einem Hohlspiegel reflectirte Licht einer in dem Kasten befindlichen

Lampe wird durch eine convexe Linse gesammelt und auf eine Glastafel oder Transparent geworfen, auf welchem die darzustellenden Gegenstände abgebildet sind; die von hier ausgeworfenen Strahlen werden dann durch eine Sammellinse auf einer entfernten Wand vereinigt (Gespenster-Erscheinungen und Phantasmagorieen des vorigen Jahrhunderts). Jetzt benutzt man zu Geisterscenen auf Theatern den ebenen, reinen Glasspiegel, der auf der Vorderhälfte der Bühne schief aufgestellt dem Publicum subjective Bilder von Gegenständen entwirft, die unter der Bühne grell von einer elektrischen Lampe erleuchtet aufgestellt sind. Die Laterna magica hat noch Anwendung zu Nebelbildern (Dissolving views); zwei Zauberlaternen, deren Oeffnungen halb verdeckt sind, erzeugen auf einem transparenten Schirme ein gemischtes, nebelhaftes Bild. Wird nun durch Schieber die eine Oeffnung immer mehr geöffnet und die andere immer mehr geschlossen, so verschwindet das eine Bild allmälig, während das andere immer deutlicher wird; rühren diese Bilder von mehreren Glastafeln her, so können durch Verschiebungen einer oder mehrerer Tafeln Theile der Bilder sich bewegen. Aehnlich sind die Polyoramen, Dioramen, Megaskope, Phantaskope, Wunderkammern u. dergl., sowie das Scioptikon von Talbot.

360 Das **Sonnenmikroskop** (Lieberkühn 1738) erzeugt von sehr kleinen Gegenständen sehr große objective Bilder; zu diesem Zwecke müssen die kleinen Gegenstände ein sehr lebhaftes Licht ausstrahlen, damit noch jeder Theil des Bildes zur Sichtbarkeit ausreichendes Licht empfange. Man benutzt hierzu Sonnenlicht, dessen Str. durch einen Heliostat in das am Fensterladen befestigte Instrument geleitet und durch eine Linse auf den Gegenstand concentrirt werden, oder auch Knallgaslicht (Hydrooxygengas-Mikroskop) oder das el. Kohlenlicht (Photoelektrisches Mikr.); das kleine Object, ein Mückenfuß, ein Krümchen Käse mit Käsmilben, Schmetterlingsstaub, ein Tropfen mit Infusorien oder im Krystallisationszustande u. s. w. befindet sich in einem dunkeln Kasten außerhalb der Brennweite, aber sehr nahe an dem Brennpunkte einer Sammellinse, damit nach der vierten Linsenregel jenseits derselben in großer Entf. ein vergrößertes Bild entstehe. In der Gl. $d = bf/(b - f)$, die leicht aus der Linsenformel $1/b + 1/d = 1/f$ zu erhalten ist, muß d demnach nahezu $= f$ sein; folglich darf der Factor $b/(b - f)$ nur wenig von 1 abweichen; also muß f einen sehr kleinen Werth haben. Die Objectivlinse des Sonnenmikroskops muß eine sehr kleine Brennweite haben, muß stark gekrümmt und daher klein sein. Die lineare Vergrößerung wird nach Fl. $f/(d - f)$ berechnet (s. 304. 2); sie ist um so bedeutender, je kleiner $d - f$, je näher also f und d einander kommen, d. h. ebenfalls, je näher das Object am Brennpunkte liegt. Die Flächenvergrößerung ist das Quadrat der linearen. Das optische Institut von Powell und Lealand in England hat ein Objectiv von $1/2^{mm}$ Brennweite angefertigt, das eine lineare Vergrößerung $= 3000$ und demnach eine Flächenvergrößerung von 9 Mill. möglich macht.

361 **Das Mikroskop** (Hans und Zacharias Janssen in Middelburg 1590). 1. Die Lupe oder das einfache Mikroskop dient dazu, sehr kleine dem Auge sehr nahe gebrachte Gegenstände deutlich und vergrößert zu sehen. Ist nämlich ein Gegenstand ab (Fig. 227) dem Auge sehr nahe, so erscheint er zwar unter einem großen Gesichtswinkel, also vergrößert, aber undeutlich, weil er sich innerhalb der deutlichen Sehweite befindet. Durch eine Sammellinse nun, die man zwischen das Auge und den Gegenstand bringt und zwar so, daß der Gegenstand

Fig. 227.



innerhalb der Brennweite liegt, entsteht nach der sechsten Linsenregel auf der Seite des Gegenstandes ein imaginäres, entfernteres, vergrößertes, aufrechtes Bild für ein Auge, das sich auf der anderen Seite der Linse befindet. Das Auge sieht deßhalb einen sehr nahen Gegenstand durch eine Sammellinse scheinbar in die Weite des deutlichen Sehens gerückt und vergrößert; die Sammellinse ist daher eine Lupe, ein einfaches Mikroskop. Die Vergrößerung folgt aus der Formel $1/b + 1/d = 1/f$, in welcher b negativ zu setzen ist, da sich Gegenstand und Bild auf derselben Seite befinden. Aus der entstehenden Gleichung $1/d - 1/b = 1/f$ folgt $d = bf/(b + f)$.

Nun verhält sich aber nach 304. 2 oder auch nach Fig. 227 die Größe AB des Bildes zu der des Gegenstandes ab wie b : d; dieses Verhältniß, die lineare Vergrößerung nimmt durch Einsetzung des Werthes für d die Form an $(b + f)/f$ oder annähernd b / f. Statt b muß hier die deutliche Sehweite gesetzt werden. Diese Formel zeigt, daß die Vergrößerung um so bedeutender ist, eine je kleinere Brennweite die Lupe hat.

Je kleiner die Brennweite einer Linse wird, desto größer wird die sphärische und die chromatische Abweichung; die starke Vergrößerung entsteht daher auf Kosten der Deutlichkeit; auch bieten Linsen von kleiner Brennweite, d. i. kleine Linsen nur ein kleines Gesichtsfeld dar, in welchem wegen der starken Vergrößerung das Licht sehr schwach ist, so daß kleine Lupen die Augen sehr anstrengen. Man kann zwar die sphärische und die chromatische Abweichung durch Verbindung zweier Linsen schwächen, wie es bei Fraunhofers, Wilsons und Plößls Lupe geschehen ist, aber nicht ganz beseitigen. Die sphärische Abweichung ist auch bei den deutschen Cylinderlupen gering, weil die beiden Krümmungen verschieden sind, sowie bei Coddingtons und Brewsters Lupe, welche die Randstrahlen durch Einschuitte und Einschnürungen in der Mitte des Glascylinders beseitigen; aber diese Lupen müssen zu nahe an das Object gehalten werden. Auch bei Edelsteinlupen sind bei gleicher Vergrößerung die Abweichungen geringer, weil die Brechung derselben stärker ist als bei Glaslupen; Glaskügelchen und Wassertropfen können stark gekrümmte Lupen bilden, ohne die Schwierigkeiten des Schleifens zu bieten. Obwohl nun mittels der Lupe, welcher Name gewöhnlich einer etwa 20fach vergrößernden Linse ohne Stativ und Objecttisch zukommt, und mit dem einfachen Mikroskop, das aus einer bis 200fach vergrößernden Lupe mit Stativ, Objecttisch und Beleuchtungsspiegel besteht, bedeutende Forschungen bis in unser Jahrhundert gemacht wurden, so ist doch das zusammengesetzte Mikroskop jetzt in allgemeiner Anwendung.

362 2. Das zusammengesetzte Mikroskop besteht aus einer oder mehreren Sammellinsen, die dem Gegenstande zugerichtet sind und daher das Objectiv bilden, und einer für das Auge bestimmten Sammellinse, die daher Ocular genannt wird (Fig. 228). Das Objectiv b hat eine sehr kleine Brennweite und entwirft deshalb

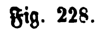
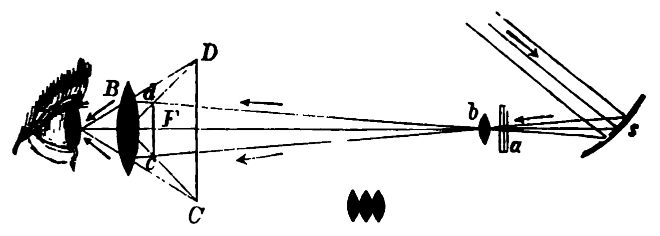


Fig. 228.



von einem jenseits der Brennweite nahe am Brennpunkte gelegenen Objecte a ein umgekehrtes und stark vergrößertes, reelles Bild dc auf der anderen Seite der Linse (Linsenregel 4). Das Ocular B ist eine Lupe, durch welche dieses reelle Bild betrachtet wird; sie hat eine solche Lage, daß sich das Objectivbild innerhalb ihrer Brennweite befindet und erzeugt daher für das Auge ein vergrößertes Bild DC dieses Bildes (6.). Die Vergrößerung des Mikroskops ist das Product der Vergrößerungen des Objectivs und des Oculars. Das Object a wird von einem Spiegel s beleuchtet; das von demselben kommende Lichtbündel kann durch eine drehbare Blende nach Bedürfniß verändert werden.

Die Reinheit der mikroskopischen Bilder verlangt die Beseitigung der chromatischen und der sphärischen Abweichung beider Linsensysteme. Der Achromatismus des Objectivs wird durch die bekannte Verbindung einer Convexlinse von Crownglas mit einer Concavlinse von Flintglas erzielt; die sphärische Abweichung desselben wird durch Verbindung von mehreren achromatischen Linsen beseitigt (Selligue 1824); diese bedürfen auch nicht einer so kleinen Brennweite, weil 2 Linsen von doppelter Brennweite dasselbe leisten wie eine von einfacher Brennweite, können also leichter angefertigt werden, und außerdem läßt jede folgende Linse die Randstr. der vorhergehenden nicht durch, womit die sphärische Abweichung wegfällt. Der Achromatismus des Oculars wird meistens durch eine eigene Verbindung zweier plan-

convexen Linsen bewirkt, welche Campanis Ocular (1655) genannt wird und in eine Röhre gefaßt ist. Die zweite größere dieser Linsen nimmt die vom Objectiv kommenden Str. vor ihrer Vereinigung auf, vergrößert ihre Convergenz und erzeugt so ein näheres und kleineres Bild; sie wird auch Collectiv genannt; die erste, am Auge befindliche Linse, das eigentliche Ocular hat eine solche Lage und Größe, daß die verschiedenfarbigen Bilder des Collectivs sich gegenseitig decken. Diese Verdoppelung des Oculars und ein zwischen seinen beiden Theilen angebrachtes Diaphragma hebt die sphärische Abweichung des Oculars auf.

Das **Gesichtsfeld** des zusammengesetzten Mikroskops übertrifft bedeutend das der Lupe. Weil nämlich das Objectiv schon eine starke Vergrößerung bewirkt, so ist beim Ocular eine solche nicht mehr nöthig, ja sie ist sogar verwerflich, weil sonst die nicht zu vermeidenden Ungenauigkeiten des Objectivbildes vergrößert würden; deßhalb wird das Ocular groß genommen und bietet daher auch ein großes Gesichtsfeld; denn dasselbe wird durch den Winkel gemessen, unter welchem das Ocular von der Mitte des Objectivs aus erscheint. Das Campani'sche Ocular verdoppelt dieses Gesichtsfeld noch. Man vergleicht die Gesichtsfelder verschiedener Mikroskope durch die Anzahl der mikrometrischen Glasfelder einer und derselben Mikrometerplatte, welche zur Ausfüllung der Gesichtsfelder nöthig sind.

Die **Vergrößerung** des Mikroskops ist um so stärker, je kleiner die Brennweiten der beiden Gläser sind; sie geschieht auf Kosten der Helligkeit, der Schärfe und des Gesichtsfeldes. Man hat daher bei jedem Mikroskop mehrere Oculare, um nach Bedürfniß größere Schärfe oder stärkere Vergrößerung zu gewinnen. Obwohl die Vergrößerung berechnet werden kann, wenn man die Brennweiten kennt, so ist doch auch eine practische Auffindung derselben erforderlich. Man legt als Object ein Glasmikrometer unter und neben dasselbe ein Papierblatt, auf welchem man mittels der Camera lucida die gesehenen Theilstriche nachzeichnet. Sind dieselben z. B. auf der Platte nur $^{1}/_{100}$ mm, auf der Zeichnung aber 4 mm von einander entfernt, so ist die Vergrößerung eine 400fache. Helmholtz (1873) berechnet theoretisch die Größe der kleinsten, mit Mikroskopen wahrnehmbaren Distanz auf $^{1}/_{3630}$ mm; hiernach wären die Angaben von Sollitt und Harrison, daß von den erkennbaren Linien der Navicula Arcus 5120 auf 1 mm gingen, zu bezweifeln. Die stärkste Vergrößerung erreichte Hartnack in Paris (1867), der Nachfolger Oberhäusers, mit seinem Immersionsmikroskop, in welchem das unterste Objectiv in einen Tropfen Wasser, Glycerin oder Mohnöl taucht. Mit einem solchen Mikroskop wäre noch eine Distanz von $^{1}/_{4943}$ mm erkennbar, vorausgesetzt, daß Str. von 180° Divergenz zur Vereinigung gelangen könnten. Da dies jedoch nicht möglich ist, so beträgt nach Harting die kleinste Distanz nur $^{1}/_{3313}$ mm. Durch die von Helmholtz vorgeschlagene Anwendung von blauem Lichte steigerte Hartnack (Wiener Ausstellung 1873) die Leistungsfähigkeit seiner Immersionsmikroskope bis zur Wahrnehmung von $^{1}/_{3654}$ mm.

Die **Prüfung** eines Mikroskops muß sich außer der Vergrößerung und dem Gesichtsfelde auch auf die Helligkeit und Schärfe erstrecken. Ein gutes Mikroskop muß mit 300facher Vergrößerung noch bei einer Kerzenflamme hinreichend helle Bilder geben. Hinsichtlich der Schärfe unterscheidet man die definirende Schärfe, welche sich auf die Genauigkeit der Umrisse bezieht, und die penetrirende Schärfe, welche eine genaue Wiedergabe der inneren Einzelnheiten verlangt. Zur Prüfung benutzt man besonders die Flügelschuppen des Schmetterlings Hipparchia Janira, gelbes Sandauge, besser aber die Nobert'schen Platten und die Peters'schen Kleinschriften; auf $^{1}/_{1600}$ bis $^{1}/_{365\,000}$ □″ engl. ist das „Vater unser" geschrieben. Die Deutlichkeit ist durchschnittlich bei 300—400facher Vergrößerung am größten, richtet sich aber sehr nach der Beschaffenheit der Objecte. — Das Mikroskop hat Anwendung zum Studium des inneren Baues des Menschen, der Thiere, der Pflanzen, zur Erkennung der kleinsten Thier- und Pflanzenformen, der Krystalle, der Bodenarten, dann in der Pathologie, Technik, gerichtlichen Medicin, in der mikroskopischen Geologie u. s. w.

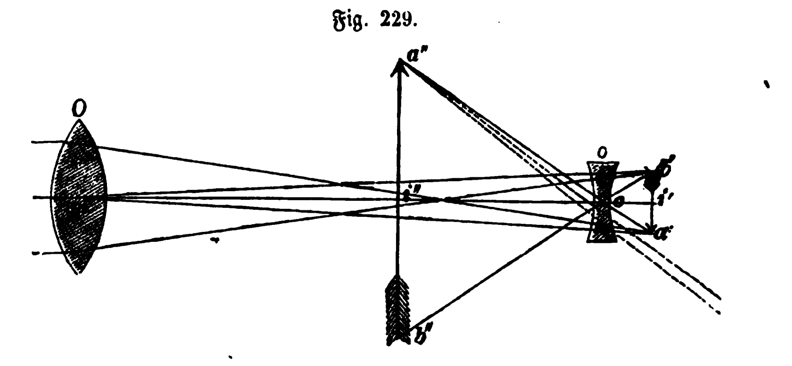
Das Fernrohr (Hans Lippershey 1608). Man unterscheidet Linsenfernrohre oder Refractoren und Spiegelfernrohre oder Reflectoren. Der Name Teleskop wird vorzugsweise den letzteren, der Name Fernrohr vorzugsweise den ersteren gegeben. 363

a) **Refractoren.** 1. **Das holländische oder Galilei'sche Fernrohr** (Fig. 229) besteht aus eine biconvexen Linse O von großer Brennweite als Objectiv und einer biconcaven Linse o von kleinerer Brennweite als Ocular. Die Vergrößerung ist gleich dem Quotient der beiden Brennweiten, die Länge des Fernrohres, d. i. die Entfernung der beiden Linsen ist gleich der Differenz der Brennweiten, das Gesichtsfeld ist die Oeffnung eines Kegels, dessen Spitze der Mittelpunkt des Objectivs und dessen Basis die Pupille ist.

Durch das convexe Objectiv würde nach der zweiten Linsenregel von einem entfernten Gegenstande ab ein umgekehrtes, reelles, verkleinertes Bild a′b′ in der Nähe des Brenn-

punktes entstehen. Das concave Ocular hat aber eine solche Stellung, daß die Str. vor der Vereinigung auf dasselbe fallen, und zwar ist die Entf. des Oculars von a′b′ etwas größer als die Zerstreuungsweite (Brennweite) des Oculars. Es werden hierdurch (s. 305.) die convergenten Str. divergent und kreuzend gemacht, wodurch für das Auge das Bild abermals umgekehrt und daher aufrecht, außerdem aber vergrößert erscheint. Der Str. a′m geht in gerader Richtung nach a; daher ist $i'ma'$ der halbe Gesichtswinkel des Objects

Fig. 229.



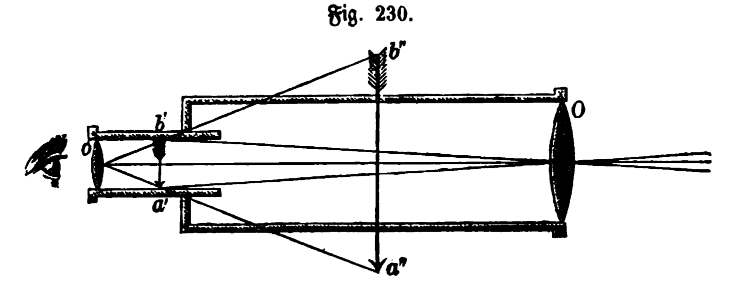
von m aus, oder, da das Fernrohr gegen die Objectdistanz klein ist, vom Auge aus. Der halbe Gesichtswinkel des Bildes $a''ci'' = i'ca'$. Das Verhältniß dieser Winkel gibt die Vergrößerung. Nun ist $\tan i'ma' = i'a' / i'm = i'a' / f$, da $i'm$ sehr nahe die Brennweite f des Objectivs ist; ebenso ist $\tan i'ca' = i'a' / i'c = i'a' / f'$, da $i'c$ nahe gleich der Brennweite f' des Oculars ist. Bei diesen kleinen Winkeln ist das Verhältniß der Winkel sehr nahe gleich dem Verhältnisse der Tangenten; folglich ist die Vergrößerung $= (i'a' / f') : (i'a' / f) = f : f'$. Hieraus ist leicht ersichtlich, daß das Objectiv eine große und das Ocular eine kleine Brennweite haben muß, daß also auch die erstere Linse groß, die letztere klein wird. Indessen darf die letztere doch nicht sehr klein werden, weil sonst das Gesichtsfeld, dessen Basis sich bei ruhigem Sehen, wegen der starken Divergenz der aus dem Ocular tretenden Str. auf die Pupille beschränkt, nicht durch Bewegungen des Kopfes etwas erweitert werden könnte; deshalb sind keine bedeutenden Vergrößerungen mit diesem Fernrohre zu erreichen; es wird daher nur in Fällen verwendet, wo eine geringe Länge bei mäßiger Vergrößerung verlangt wird, wie bei Operngucken, Feldstechern u. dgl.; denn die Entf. der beiden Linsen ist nur gleich $i'm - i'c = f - f'$. Trotzdem entdeckte Galilei mit diesem Fernrohre, das er auf die erste Kunde hin selbständig erfand, die Berge und Krater des Mondes, die Jupitertrabanten, den Saturnring, die Sonnenflecken, die Lichtphasen der Venus, löste die Milchstraße und die Krippe in Sterne auf. In der Astronomie wurde es verdrängt durch

364 2. Das Keppler'sche oder astronomische Fernrohr (Keppler 1611, Scheiner 1617). Es besteht aus einer Sammellinse von großer Brennweite als Objectiv und einer Sammellinse von kleiner Brennweite als Ocular. Das Bild ist umgekehrt; seine Vergrößerung ist gleich dem Quotient der beiden Brennweiten, seine Länge gleich der Summe derselben, und sein Gesichtsfeld gleich der Oeffnung eines Kegels, dessen Grundfläche das Ocular und dessen Spitze der Mittelpunkt des Objectivs ist; die Helligkeit wächst mit der Fläche des Objectivs.

Der Strahlengang dieses Fernrohres ist aus Fig 230 ersichtlich; durch das Objectiv O entsteht nach der 2ten Linsenregel von einem entfernten Gegenstande ab in der Nähe des Brennpunktes ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild a′b′, welches durch das Ocular wie durch eine Lupe betrachtet wird und daher vergrößert, aber nicht zum zweitenmale umgekehrt wird; die erste Umkehrung bleibt daher bestehen; die Vergrößerung wird wie bei dem Galilei'schen Fernrohre bewiesen. Da a′b′ in der Nähe des Brennpunktes beider Linsen steht, so ist die Entf. derselben von einander gleich der Summe der Brennweiten. Die auf das Ocular gelangenden Lichtstr. kreuzen sich in dem Mittelpunkte des Objectivs; daher gehören Str., welche außerhalb derjenigen liegen, die zu dem kreisförmigen Rande des Oculars gelangen, nicht mehr zu dem Gesichtsfelde, woraus der Satz über das Gesichtsfeld folgt. Das Ocular ist bei diesem wie bei anderen Fernrohren verschiebbar, damit das Bild in die Weite des deutlichen Sehens gerückt werden kann; je näher das Object liegt, um so weiter rückt das Bild vom Objectiv weg, um so weiter muß das Ocular ausgezogen werden; soll

das Fernrohr als Meßinstrument dienen, so ist in demselben ein Fadenkreuz angebracht, das mit dem Ocular verschiebbar ist. Zwar ist die umgekehrte Lage der Bilder ein Nachtheil dieses Fernrohres, der indeß bei astronomischer Anwendung nicht stört; dasselbe gewährt aber ein ziemlich großes Gesichtsfeld und ausreichende Helligkeit, wodurch es möglich wird, durch Vergrößerung des Objectivs die bedeutendsten Bildvergrößerungen zu gewinnen, während bei einem und demselben Fernrohre die Aufsetzung kleinerer Oculare ebenfalls eine Vermehrung der Bildgröße möglich macht. Vor Erfindung der Achromasie durfte man kleine Ocu-

Fig. 230.

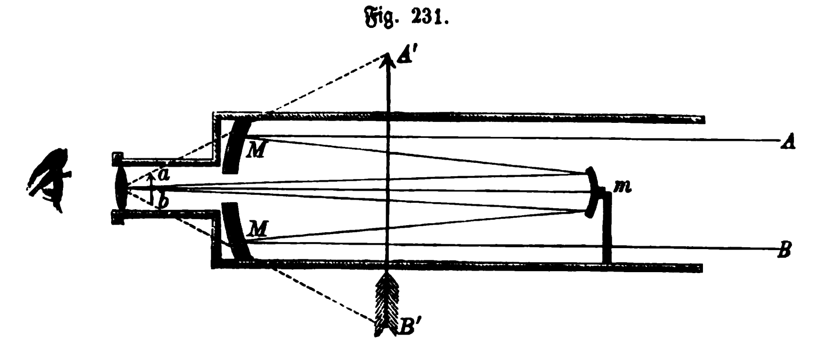


lare wegen ihrer starken Farbenzerstreuung nicht anwenden; man suchte sich durch große Objective zu helfen, wodurch aber die Fernrohre unhandlich lang und biegsam wurden. Huyghens (1684) befestigte daher das Objectiv auf einer hohen Stange, einem Mastbaume, einem Giebel und sah von unten mittels des Oculars durch dasselbe, und Newton, an dem Achromatismus verzweifelnd, warf sich auf die Spiegelfernrohre. Als nun dennoch der Achromatismus erfunden wurde und durch Fraunhofer das Geheimniß einer guten Flintglasbereitung aufgedeckt war, wandte man sich wieder den Linsenfernrohren zu. Fraunhofer lieferte seine ausgezeichneten Instrumente, u. A. nach Dorpat und Boston (35cm Oeffnung, 7m Brennweite, 2000 f. Vergrößerung). Der größte Refractor ist der in Washington von Clark (71cm Oeffn.). Auf der Privatsternwarte des Banquiers Bischoffsheim bei Nizza soll ein Aequatoriale von 18m Länge und 76cm Oeffn. aufgestellt werden. Clark baut für Pulkowa einen neuen Refractor von 80cm und für das Lick'sche Observatorium auf dem Mount Hamilton in Californien einen solchen von 914mm Oeffnung, für deren riesenhafte, mehrere Centner wiegende Objective Feil in Paris das Glas liefert. — Nach Littrow (1832) kann man auch die Flintglaslinse in einiger Entfernung von der Crownglaslinse aufstellen, ohne den Achromatismus zu beeinträchtigen, und bedarf dann nur kleinerer Flintglaslinsen; solche dialytischen Fernrohre können eine große Oeffnung und daher eine große Lichtstärke und außerdem ein großes Gesichtsfeld erhalten, sind daher besonders geeignet als Kometensucher, Marinefernrohre u. drgl. — Zur practischen Messung der Vergrößerung sieht man mit dem einen Auge durch das Fernrohr, und mit dem anderen Auge direct nach einem entfernten Maßstabe und zählt, wie viele Skalentheile mit freiem Auge auf einen Theil im Fernrohre fallen. Zur Prüfung der Deutlichkeit benutzt man die Doppelsterne, zur Prüfung der raumdurchdringenden Kraft die Fixsterne 8—15ter Größe, zur Messung des Gesichtsfeldes die Zeit, die ein Stern zum Gange durch das Gesichtsfeld braucht. Zu genauen Messungen dient das Fadenkreuz oder das Glasmikrometer, zum Einstellen der Sucher, ein kleines paralleles Fernrohr mit großem Gesichtsfelde. Die kleinen Fernrohre, Perspective oder Feldstecher können auch als Distanzmesser dienen, wenn sie mit einem Mikrometer versehen sind. Für irdische Beobachtung ist indeß die umgekehrte Lage der Bilder im astronomischen Fernrohre störend; man schaltete daher nach Keppler noch eine dritte Sammellinse ein, welche die Aufrechtstellung bewirkte, aber das Gesichtsfeld sehr verkleinerte. Erst Rheita zeigte (1665), daß man mittels eines Oculars von 4 planconvexen Linsen ein aufrechtes Bild bei gutem Gesichtsfelde erlangen könne; doch wird hierdurch eine bedeutende Lichtschwächung herbeigeführt (Erdfernrohr).

b) Reflectoren. 1. Das Gregory'sche (1663) Teleskop (Fig. 231). 365
Es besteht aus einem in der Mitte durchbrochenen großen parabolischen Hohlspiegel MM, der nach der zweiten Hohlspiegelregel von einem entfernten Gegenstande AB in der Nähe des Brennpunktes ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild erzeugt. Der zweite, kleine Hohlspiegel m wird nun so gestellt, daß dieses Bild zwischen seinen Brennpunkt und seinen Mittelpunkt fällt; hierdurch entsteht nach der vierten Hohlspiegelregel jenseits des Mittelpunktes ein abermals umgekehrtes, also aufrechtes

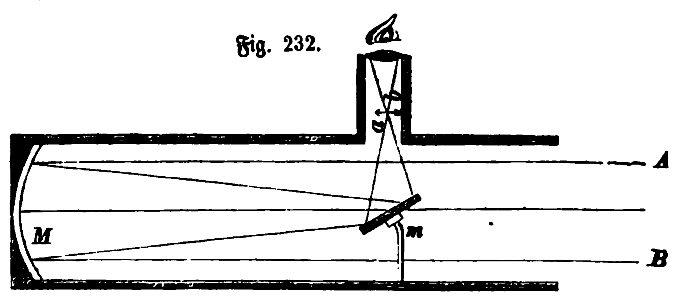
und vergrößertes Bild ab, das nun durch eine Ocularsammellinse wie durch eine Lupe betrachtet wird und dadurch in A'B' aufrecht und nochmals vergrößert erscheint.

Fig. 231.



2. Das Newton'sche (1671) Teleskop. Newton suchte den mittleren, also den besten Theil des großen Hohlspiegels M (Fig. 232) zu behalten und ließ die von demselben reflectirten Strahlen vor ihrer Vereinigung von einem unter 45° gegen die Achse geneigten Planspiegel reflectiren, wodurch sie erst in einer seitlichen Röhre ein kleines Bild ab bilden,

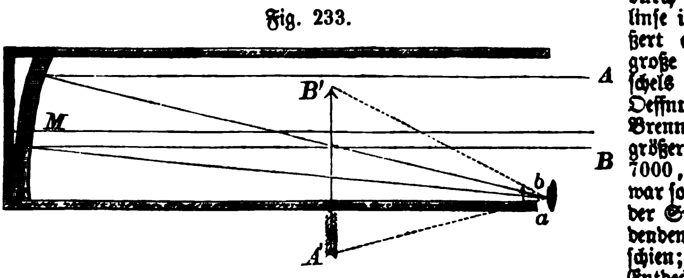
Fig. 232.



das mittels einer Ocularlinse vergrößert wird. Cassegrain setzte in beiden Teleskopen an Stelle der kleinen Spiegel einen Convexspiegel. Die Spiegelteleskope kamen erst zu rechtem Ansehen, als Hadley (1718) u. A. den Guß und die Politur der parabolischen Hohlspiegel vervollkommneten, und als W. Herschel sie zu bedeutender Größe brachte.

4. Herschels Teleskop (1789). (Fig. 233). Der Hohlspiegel M hat eine solche schiefe Lage, daß das erste Bild ab an dem unteren Rande des Rohres entsteht und dort durch eine Sammellinse in A'B' vergrößert erscheint. Das große Teleskop Herschels hatte 5' engl. Oeffnung und 40' Brennweite; die Vergrößerung ging bis zu 7000, die Lichtstärke war so bedeutend, daß der Sirius mit blendendem Glanze erschien; die meisten Entdeckungen machte aber Herschel mit seinem 20füßigen Reflector. Das Riesenteleskop von Lord Rosse (1843) in Parsonstown bei Dublin (Kosten 250 000 Mk.) hat 63' Brennweite und 6' Oeffnung; es ist von Wichtigkeit für die Auflösung der Nebelflecke gewesen. — In neuerer Zeit sind die Instrumente mit Hohlspiegeln wieder zur Geltung gekommen, besonders durch Foucault, der nach Steinheils Vorgang (1856) statt der Metallspiegel die versilberten gläsernen Hohlspiegel bis zu 78cm Oeffnung und 2,5m Brennweite anwandte und ein total reflectirendes

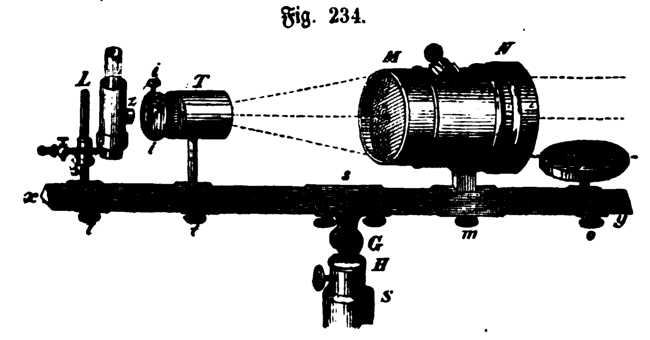
Fig. 233.



Prisma an die Stelle des Planspiegelchens, sonst aber Newtons Einrichtung zur Anwendung brachte. Diese versilberten Glasspiegel bieten den Vortheil eines geringeren Gewichtes, einer größeren spiegelnden Kraft, einer größeren Härte und daher vollkommeneren Politur und einer längeren Dauer; denn ein einmaliger Schliff des Glases genügt für immer, da eine Ersetzung des Silberhäutchens einer Erneuerung gleichkommt. Außerdem sind die Spiegelfernrohre gegen die Linsen dadurch im Vortheil, daß der Spiegel nur der Politur auf einer Seite bedarf, und daß die Spiegel von selbst achromatisch sind; allerdings werden alle diese Vortheile durch ihre unhandliche Größe beeinträchtigt.

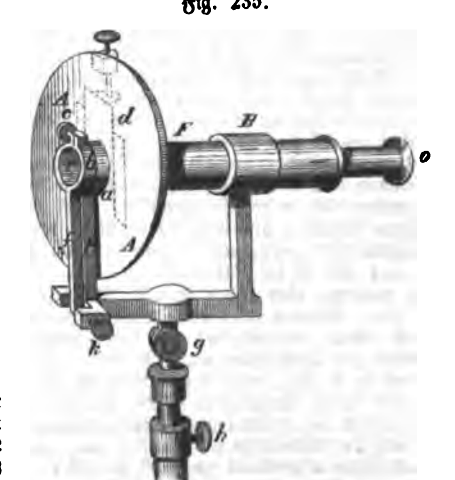
366 **Der Schlierenapparat** (Töpler 1867) dient zur Wahrnehmung von Veränderungen der Dichtigkeit, der Elasticität, der Temperatur, von Bewegungen im Inneren durchsichtiger Körper, insofern dieselben eine Veränderung des Brechungsvermögens bewirken, z. B. zur Wahrnehmung von Schlieren im Glase, d. h. von Stellen, die eine andere Dichte als die übrige Glassmasse besitzen. Wenn von einer scharf abgegrenzten Lichtquelle (Illuminator) Licht auf ein Linsensystem (Kopf) fällt, so erscheint durch ein Fernrohr mit Schiebvorrichtungen (Analysator) das Gesichtsfeld der Linse hell. Wird aber der Schieber des Analysators so verschoben, daß seine Kante mit der des Illuminators zusammenfällt (empfindliche Einstellung), so erscheint das Gesichtsfeld dunkel, insofern die Linse keine Schliere enthält. Findet sich aber in der Linse eine stärker brechende Schliere oder wird zwischen den Kopf und den Analysator an irgend einer Stelle eine stärker brechende Substanz angebracht, so wird durch diese noch Licht über den Rand des Schiebers hinausgebrochen, und die Schliere erscheint hell auf dunkelm Grunde. Ist die Schliere schwächer brechend, so ist sie schon vor der empfindlichen Einstellung dunkel, während das Gesichtsfeld noch hell ist, erscheint also dunkel auf hellem Grunde.

Fig. 234.



Die Einrichtung des Apparates zeigen Fig. 234 und 235. Auf einer Stahlschiene xy sitzt der Illuminator, bestehend aus einer Lampe L und dem Rohre T, dessen Spaltvorrichtung mittels des Schiebers i ein genau geradlinig begrenztes Segment als Lichtöffnung am linken Ende des Rohres übrig läßt; dann folgt der Kopf MN, bestehend aus einem achromatischen Doppelobjectiv in solcher Entf. von i, daß i jenseits des Brennpunktes von MN liegt, und daß daher diesseits von MN in großer Entf. ein reelles Bild der Lichtöffnung entsteht. Auf den Tisch V kommen die zu untersuchenden Gegenstände. In einer Entfernung von 10—20′ steht der Analysator (Fig. 235), bestehend aus einem astronomischen Fernrohre Fo von 15facher Vergrößerung und der Metallscheibe A, vorn mit einem Tubus r, hinten mit einem Diaphragma d, dessen untere geradlinige Kante von der kreisförmigen Oeffnung ein Segment abschneidet. Um die empfindliche Einstellung zu erhalten, muß zunächst das Bild der Lichtöffnung so in den Tubus r gebracht werden, daß die gerade Grenzlinie derselben parallel zu der geraden Grenzkante des Diaphragmas central durch den Tubus geht; dann wird die letztere Kante so lange durch die Schraube bei d verschoben, bis sie mit der ersteren zusammenfällt; dies ist die empfindliche Einstellung. Man kann

Fig. 235.



mit diesem Apparate nicht blos Schlieren entdecken, sondern vieles sonst Unsichtbare sehen: 1. Die Diffusion von Aether in Wasser und die Aetherdämpfe in der Luft. 2. Das Fallen eines Wassertropfens durch Wasser bis auf den Boden herab. 3. Wasserströmungen in gleich hoch gefüllten, durch eine Röhre verbundenen Gefäßen. 4. Die Schallwellen des elektrischen Funkens. 5. Die reflectirte Welle ist gleich der einfallenden. 6. Die gebrochene Welle in dichterem Medium ist kleiner, in dünnerem größer, als in dem früheren Medium. 7. Die ungestörte Interferenz der Wellen. 8. Der elektrische Funke ist ein Luft aus einander stoßender Impuls; das sofortige Wiederzusammenschlagen der Luft ist durch die Wärme verhindert. 9. Zwischen dem Schallfunken und dem Entladungsfunken verfließt eine gewisse Zeit, ohne Flasche 0,0 000 015 Sec., mit Flasche 0,000 018 bis 0,000 135 Sec., woraus folgt, daß die Entladung einer Flasche mehr Zeit braucht.

367 **Aufg. 568.** Wie groß ist die Wellenlänge der Fraunhofer'schen Linien in Wasser? Aufl.: A = 760 . ³/₄ = 570, B = 515, C = 504, D = 433; E = 305, F = 365, G = 323, H = 297 $\mu\mu$. — A. 569. Der B.-E. von B ist im Flintglas = 1,627, von H = 1,671; wie groß sind ihre Wellenlängen? Aufl.: 422, 244 $\mu\mu$. — A. 570. Die Wellenlänge von B ist in Crownglas 450; wie groß ist der B.-E. dieses Glases für B? Aufl.: 1,526. — A. 571. Der brechende Winkel eines Flintglasprismas sei 35°, das Minimum der Ablenkung für die 3 Linien D, F und G = 21° 34′ 30″, 21° 59′ 30″, 22° 20′ 10″; wie groß sind die B.-E. der 3 Linien? Aufl.: Nach 301. ist n für D = 1,576, für F = 1,5865, für G = 1,5953. — A. 572. Läßt man ein Bündel Sonnenstr. auf ein gleichs. Prisma in ¹/₃ der Höhe einer Seitenfläche so einfallen, daß der Str. im Prisma zu einer zweiten Seitenfläche parallel läuft, welche Erscheinung tritt dann ein? Aufl.: Aus jeder Seitenfläche tritt ein weißes und ein spectrales Bündel heraus wegen der Brechung und der Reflexion an jeder Fläche; durch Zeichnung zu finden. — A. 573. Auf ein Crownglasprisma von 30° trifft unter dem Einfallswinkel 30° ein weißes Strahlenbündel; die B.-E. von Roth und Violett seien 1,526 und 1,547; wie groß sind die Austrittswinkel und wie groß die totale Dispersion; Aufl.: 16° 43′ 30″ und 17° 22′ 56″; Dispersion = 39′ 26″. — A. 574. Wie lang ist das Sp. auf einer 90^{cm} entfernten Wand? Aufl.: 2 . 90 sin 19′ 43″ = $1{,}124^{cm}$. — A. 575. Für ein Flintglasprisma von 30° sind die B.-E. der rothen und violetten Str. 1,6 und 1,64; der Einfallswinkel ist 90°; wie groß ist die Dispersion? Aufl.: 1° 57′ 17″. — A. 576. Wie lang ist das Sp. auf einem 2^m entfernten Schirme? Aufl.: $6{,}82^{cm}$. — A. 577. Wie erscheint auf dunkelm Grunde ein weißer Punkt, eine weiße Linie, ein weißes Rechteck durch ein Prisma, dessen brechende Kante der Linie parallel und in einem zweiten Falle zu derselben senkrecht steht; wie erscheint ein dunkler Punkt, eine dunkle Linie, ein dunkles Rechteck auf weißem Grunde, nebst Begründung? — A. 578. Was würde es bedeuten, wenn in einem Sonnensp. die Linie D plötzlich hell aufblitzen würde? Aufl.: Eine Eruption von glühendem Natriumdampf; Erklärung. — A. 579. Was würde im Sonnensp. das Verschwinden der dunkeln D-Linie bedeuten? Aufl.: Das Verschwinden des Natriums aus der Sonnenhülle; Erkl. — A. 580. Was würde das Breiterwerden und das Dunklerwerden der D-Linie bedeuten? Aufl.: Eine Vermehrung und eine Abkühlung des Na-Dampfes; Erkl. — A. 581. Wüllner nahm 1868 in einer Geißler'schen Röhre, durch die er mit Hilfe der Holtz'schen Elektrisirmaschine einen Funkenstrom der Leydner Flasche schickte, in dem entstehenden continuirlichen Sp. eine dunkle D-Linie wahr; wie ist dies zu erklären? Aufl.: Die glühende Glaswand gab das continuirliche Sp. und in die Röhre verdampftes Na die dunkle Linie. — A. 582. Was würde eine Verschiebung von D im Sonnensp. nach dem Roth hin anzeigen? Aufl.: Das Sinken des Natriumdampfes in der Sonnenhülle. — A. 583. Wie groß ist die Dispersion eines unter kleinem Winkel α aus Glas in die Luft übergehenden Str., wenn die B.-E. der rothen und violetten Str. = n_r und n_v sind? Aufl.: Weil α sehr klein, so ist $\beta_r = n_r . \alpha$ und $\beta_v = n_v . \alpha$; also ist die Dispersion $= \alpha (n_v - n_r)$. — A. 584. Wie groß ist die Ablenkung des mittleren oder gelben Str.? Aufl.: $\beta = n\alpha$; daher die Abl. $\beta - \alpha = \alpha (n - 1)$. — A. 585. Warum wird der Quotient $(n_v - n_r) / (n - 1)$ Zerstreuungsvermögen genannt? Aufl.: Nach. 583 und 584 gibt dieser Ausdruck das constante Verhältniß der mittleren Ablenkung zur Dispersion an. — A. 586. Wie groß ist das Zerstreuungsvermögen des Flintglases in A. 575, wenn der mittlere B.-E. 1,62 ist? Aufl.: 0,064; für Crownglas 0,033, Wasser 0,035, Bergkrystall 0,026, Diamant 0,038. — A. 587. Wie groß ist die Dispersion durch ein Prisma unter Voraussetzung eines kleinen brechenden Winkels B und eines kleinen Einfallswinkels α? Aufl.: $(n_v - n_r)$ B. — A. 588. Wie groß ist die Dispersion eines Diamantprismas von 10° br. W.? Aufl.: $(n_v - n_r) = 0{,}038 . (n - 1) = 0{,}056$; daher die Dispersion = 0,56°. — A. 589. Einen allgemeinen Ausdruck für die Dispersion durch ein Prisma aufzufinden, wenn α und B nicht sehr klein sind? Aufl.: Fig. 194 ergibt $\sin \alpha'_v = \sin B \sqrt{(n_v^2 - \sin^2 \alpha_v)} - \cos B \sin \alpha_v$; ebenso findet man auch $\sin \alpha'_r = \sin B \sqrt{(n_r^2 - \sin^2 \alpha_r)} - \cos B \sin \alpha_r$; die Dispersion ist dann $\alpha'_v - \alpha'_r$. — A. 590. Wie groß ist der brechende Winkel B′ des Flintglasprismas, welches das Crownglasprisma in

die bei der Bedeckung des einen Spiegels sofort verschwanden. Fresnel wandte homogenes Licht von allen Spectralfarben an und fand die Interferenzstreifen von verschiedener Breite, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Dies erklärte er durch die verschiedene Wellenlänge der verschiedenen Farben; die Mitte a (Fig. 236) der gemeinschaftlichen Stelle empfängt von den Spiegeln die reflectirten Lichtstrahlen da und ea, welche mit ihren einfallenden Str. di und ei die Strahlenwege adi und aei ausmachen; diese Strahlenwege sind einander gleich, weil sie gleich den Entf. des Punktes a von den beiden Spiegelbildern i′ und i″ sind und weil diese Entf. ai′ und ai″ gleiche Längen haben. Es haben demnach diese Str. keinen Gangunterschied, sie verstärken sich: in der Mitte der gemeinschaftlichen Stelle ist Helligkeit. Dagegen für den Punkt b sind die beiden Str. i′b und i″b nicht einander gleich; beträgt ihr Unterschied eine halbe Wellenlänge des angewendeten homogenen Lichtes, so heben sie sich auf, bei b muß Dunkelheit stattfinden. Für den Punkt c ist der Gangunterschied der Str. i′c und i″c noch mehr gewachsen; beträgt er hier eine ganze Wellenlänge, so verstärken sich die Str., bei c findet Helligkeit statt u. s. w.; die Größe von ac, also auch die Breite der hellen und dunkeln Streifen hängt offenbar von der Wellenlänge des Lichtes ab; der Unterschied der Str. wird von a nach b hin um so eher eine halbe Wellenlänge sein, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist; das dunkle b wird um so näher an a liegen, je kleiner die Wellenlänge ist, die violetten Streifen sind schmäler als die rothen, und zwar ist die Streifenbreite der Wellenlänge direct proportional, wie folgender Beweis ergibt: Sei der Gangunterschied der Strahlen $= d$ und l die Wellenlänge, so muß die Beziehung $d = {}^1/_2 \,.\, nl$ für die Interferenz bestehen, wobei n für die dunkeln Streifen eine ungerade, für die hellen eine gerade Zahl sein muß. Ist weiter $i'i'' = x$, $am = y$ und ab, die Breite eines Streifens, $= \beta$, so ist $i'b = \sqrt{[y^2 + ({}^1/_2 x - \beta)^2]}$ und $i''b = \sqrt{[y^2 + ({}^1/_2 x + \beta)^2]}$. Entwickelt man die beiden Wurzeln und vernachlässigt wegen der Kleinheit von β und x die höheren Potenzen dieser Größen, so ergibt sich $d = i''b - i'b = x\beta / y$. Setzt man die beiden Werthe von d einander gleich, so folgt $\beta = {}^1/_2 n \,.\, ly / x$, worin ${}^1/_2 n$ wegzufallen hat, wenn es sich um die Entf. zweier benachbarten Streifen voneinander handelt, weil hier die Anzahl der halben Wellenlängen $= 1$ ist; folglich ist $\beta = ly / x$, womit das Gesetz bewiesen ist. Wenn hiernach die Streifenbreite direct proportional der Wellenlänge ist, so verhält sich die Breite der Streifen im homogenen rothen Licht zu der des homogenen violetten Lichtes wie 76 zu 40. Bei Anwendung von weißem Lichte fallen in der Mitte a Streifen von allen Farben auf einander; es entsteht also eine weiße Mitte; da jedoch die gelben und rothen Streifen breiter sind als die blauen, so hat die weiße Mitte gelbrothe Ränder. Wo das Roth zu Ende ist, taucht das Violett noch nicht wieder auf; denn wenn das Roth in dem Abstande 38 von der Mitte aufhört, erscheint das Violett zuerst in dem der doppelten halben Wellenlänge entsprechenden Abstande $2 \,.\, 20 = 40$ wieder; daher folgt nach dem Roth ein dunkler Streifen, der indeß rasch diesem neuen Violett weichen muß. Auf dessen Fortsetzung legt sich zunächst Blau, dann die übrigen Farben, wodurch zum zweiten Male Weiß entsteht, das demnach einerseits einen blauvioletten, anderseits abermals einen gelbrothen Rand besitzt u. s. w. So erklären sich die farbigen Interferenzfarben Fresnels. Am einfachsten lassen sich dieselben objectiv sichtbar machen mit Quinckes (1867) Einrichtung des Spiegelversuchs: Auf ein Holzklötzchen werden 4 Kügelchen a, b, c, d (Fig. 237) von Klebwachs gelegt und diese mit zwei Streifen von Spiegelglas bedeckt, die in genau geradliniger Kante bc zusammenstoßen. Auf dieselben wird eine größere Glastafel gelegt und längs der Geraden bc etwas mit dem Finger angedrückt; dadurch erhalten die 2 Spiegel eine geringe Verschiedenheit der Richtnng und zeigen im directen Sonnenlichte die farbigen Fresnel'schen Fransen. Fresnel schon hat dieselben auch durch Brechung mit einem sehr

Fig. 236.

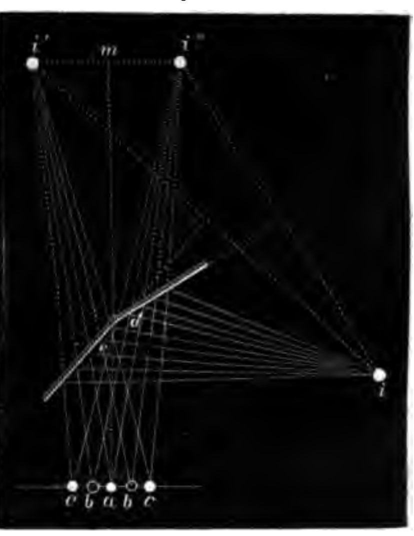


Fig. 237.

stumpfwinkeligen Biprisma hergestellt und (1862) Billet durch 2 auseinander gerückte Halblinsen und Fizeau durch 2 gegeneinander geneigte Glasplatten.

Aus der Gleichung $\beta = l y / x$ ergibt sich $l = \beta x / y$. Kennt man also die Breite der Streifen, die man mittels besonderer Vorrichtung messen kann, sodann den Abstand x der beiden Bilder und den Abstand y des Schirmes, so läßt sich die Wellenlänge l des betreffenden homogenen Lichtes berechnen. Dies ist die erste Methode zur Bestimmung der Wellenlängen der verschiedenen Farben und hieraus mittels der Formel $n = c / l$ der oft angeführten großen Schwingungszahlen (Fresnel 1818).

Das Auslöschen von Lichtstrahlen durch Interferenz scheint dem Princip der Erhaltung der Energie zu widersprechen; jedoch bewies Fresnel aus seinen (1818) aufgestellten Formeln, daß die Gesammtintensität der hellen und dunkeln Streifen gleich der des auftreffenden Lichtes ist, daß also die Auslöschung durch Verstärkung compensirt wird. — Wrede erklärte (1835) die Absorption durch Interferenz, eine Erklärung, die indeß derjenigen durch Uebertragung der Aetherschwingungen an die Körpermoleküle weichen mußte. Zu den Interferenzen gehören auch die Schillerfarben, wie z. B. die der Perlmutter und die der Irisknöpfe. Schillernde Körper haben eine äußerst fein geriefte Oberfläche. Die auftreffenden Lichtstr. werden nun sowohl von den Riefen wie von den Rinnen reflectirt; die von den letzteren reflectirten Str. sind in der Phase gegen die ersteren zurück; diejenige Farbe, für welche der Phasenunterschied gerade ½ Wellenlänge beträgt, wird aufgehoben, andere werden verstärkt; die Folge ist, daß weißes Licht farbig zurückgeworfen wird. Verändert man die Richtung der schillernden Oberfläche, so ändert sich auch die Richtung der reflectirten Str., sie können jetzt schiefer oder weniger schief gegen die Oberfläche stehen; folglich wird der Wegüberschuß des Rinnenstrahles gegen den Riefenstrahl vergrößert oder verkleinert, er wird jetzt gleich ½ Wellenlänge einer anderen Farbe sein, andere Farben als vorher werden aufgehoben und ebenso andere verstärkt; folglich muß eine Farbenänderung eintreten. Als Brewster Perlmutter in Siegellack abdrückte, zeigte dessen Oberfläche einen Perlmutterschiller. Die Irisknöpfe enthalten feine Riefensysteme von verschiedenen Richtungen, geben daher verschieden Farben.

369 **Die Farben dünner Blättchen** (Hooke 1665). Newtons Farbenringe (Newton 1673). Alle durchsichtigen Körper erscheinen im reflectirten und im durchgelassenen Lichte farbig, wenn sie hinreichend dünne Schichten bilden; die Farben ändern sich mit der Dicke der Schichten. Am bekanntesten sind die Erscheinungen an Seifenblasen, an dünnen Oelschichten, die sich auf Wasser ausbreiten, an alten Fensterscheiben, an den Oxydrinden der Metalle, wie z. B. am angelaufenen Stahl, an bis zum Zerspringen aufgeblasenen Glaskugeln, an der Haut, die schmutziges Wasser überzieht, an Sprüngen in Glas und Krystallen, die dünne Luftschichten bilden. Hooke erhielt die Lamellenfarben in Form von Ringen, indem er zwei schwach gekrümmte Glaslinsen auf einanderlegte und so eine nach außen allmälig dicker werdende ringförmige Luftlamelle herstellte. Newton machte diese Lamelle regelmäßig und der Messung zugänglich, indem er auf eine ebene Glastafel eine Linse von sehr schwacher Krümmung (40—60′ Radius) legte. Newton wandte auch bei diesem Versuche homogenes Licht an und erhielt so abwechselnde farbige und dunkle Ringe, die einen dunkeln Fleck umschließen. Dadurch fand er die Gesetze der Erscheinung: Die Dicken der Luftschicht stehen an den hellen Stellen im Verhältnisse von 1 : 3 : 5 : 7 ..., an den dunkeln Ringen im Verhältnisse von 0 : 2 : 4 ....; die Durchmesser der hellen Ringe verhalten sich wie die Quadratwurzeln der ungeraden, die der dunkeln Ringe wie die Quadratwurzeln der geraden Zahlen. Bei verschiedenem homogenem Lichte sind die Breiten der hellen Ringe verschieden, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Mit weißem Lichte erscheint der dunkle Fleck von verschiedenfarbigen Ringen umgeben, welche Newton in mehrere Ordnungen theilte: 1te Ordnung: Blau, Gelb, Weiß, Roth; 2te Ordnung: Violett, Blau, Grün, Gelb, Roth; 3te Ordnung: Purpur, Blau, Grün, Gelb, Roth; dann folgen fortwährend Grün und Roth.

Young gab 1802 die Erklärung dieser Erscheinungen nach der Wellentheorie. Die auf das dünne Blättchen treffenden Lichtstr. werden an der oberen und an der unteren Fläche desselben reflectirt; die von beiden Flächen reflectirten Str., welche auf einander oder dicht neben einander fallen, müssen sich durch Interferenz bald aufheben, bald verstärken, je nachdem die von der unteren Fläche reflectirten Str. mit den oberen in gleicher oder entgegengesetzter Phase sind, was von der Dicke der Schicht abhängt. Hierbei ist aber noch zu be-

die bei der Bedeckung des einen Spiegels sofort verschwanden. Fresnel wandte homogenes Licht von allen Spectralfarben an und fand die Interferenzstreifen von verschiedener Breite, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Dies erklärte er durch die verschiedene Wellenlänge der verschiedenen Farben; die Mitte a (Fig. 236) der gemeinschaftlichen Stelle empfängt von den Spiegeln die reflectirten Lichtstrahlen da und ea, welche mit ihren einfallenden Str. di und ei die Strahlenwege adi und aei ausmachen; diese Strahlenwege sind einander gleich, weil sie gleich den Entf. des Punktes a von den beiden Spiegelbildern i' und i'' sind und weil diese Entf. ai' und ai'' gleiche Längen haben. Es haben demnach diese Str. keinen Gangunterschied, sie verstärken sich: in der Mitte der gemeinschaftlichen Stelle ist Helligkeit. Dagegen für den Punkt b sind die beiden Str. i'b und i''b nicht einander gleich; beträgt ihr Unterschied eine halbe Wellenlänge des angewendeten homogenen Lichtes, so heben sie sich auf, bei b muß Dunkelheit stattfinden. Für den Punkt c ist der Gangunterschied der Str. i'c und i''c noch mehr gewachsen; beträgt er hier eine ganze Wellenlänge, so verstärken sich die Str., bei c findet Helligkeit statt u. s. w.; die Größe von ac, also auch die Breite der hellen und dunkeln Streifen hängt offenbar von der Wellenlänge des Lichtes ab; der Unterschied der Str. wird von a nach b hin um so eher eine halbe Wellenlänge sein, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist; das dunkle b wird um so näher an a liegen, je kleiner die Wellenlänge ist, die violetten Streifen sind schmäler als die rothen, und zwar ist die Streifenbreite der Wellenlänge direct proportional, wie folgender Beweis ergibt: Sei der Gangunterschied der Strahlen = d und l die Wellenlänge, so muß die Beziehung $d = \frac{1}{2} . nl$ für die Interferenz bestehen, wobei n für die dunkeln Streifen eine ungerade, für die hellen eine gerade Zahl sein muß. Ist weiter $i'i'' = x$, $am = y$ und ab, die Breite eines Streifens, $= \beta$, so ist $i'b = \sqrt{[y^2 + (\frac{1}{2}x - \beta)^2]}$ und $i''b = \sqrt{[y^2 + (\frac{1}{2}x + \beta)^2]}$. Entwickelt man die beiden Wurzeln und vernachlässigt wegen der Kleinheit von β und x die höheren Potenzen dieser Größen, so ergibt sich $d = i''b - i'b = x\beta / y$. Setzt man die beiden Werthe von d einander gleich, so folgt $\beta = \frac{1}{2}n . ly / x$, worin $\frac{1}{2}n$ wegzufallen hat, wenn es sich um die Entf. zweier benachbarten Streifen von einander handelt, weil hier die Anzahl der halben Wellenlängen = 1 ist; folglich ist $\beta = ly / x$, womit das Gesetz bewiesen ist. Wenn hiernach die Streifenbreite direct proportional der Wellenlänge ist, so verhält sich die Breite der Streifen im homogenen rothen Licht zu der des homogenen violetten Lichtes wie 76 zu 40. Bei Anwendung von weißem Lichte fallen in der Mitte a Streifen von allen Farben auf einander; es entsteht also eine weiße Mitte; da jedoch die gelben und rothen Streifen breiter sind als die blauen, so hat die weiße Mitte gelbrothe Ränder. Wo das Roth zu Ende ist, taucht das Violett noch nicht wieder auf; denn wenn das Roth in dem Abstande 38 von der Mitte aufhört, erscheint das Violett zuerst in dem der doppelten halben Wellenlänge entsprechenden Abstande 2 . 20 = 40 wieder; daher folgt nach dem Roth ein dunkler Streifen, der indeß rasch diesem neuen Violett weichen muß. Auf dessen Fortsetzung legt sich zunächst Blau, dann die übrigen Farben, wodurch zum zweiten Male Weiß entsteht, das demnach einerseits einen blauvioletten, andererseits abermals einen gelbrothen Rand besitzt u. s. w. So erklären sich die farbigen Interferenzfarben Fresnels. Am einfachsten lassen sich dieselben objectiv sichtbar machen mit Quinckes (1867) Einrichtung des Spiegelversuchs: Auf ein Holzklötzchen werden 4 Kügelchen a, b, c, d (Fig. 237) von Klebwachs gelegt und diese mit zwei Streifen von Spiegelglas bedeckt, die in genau geradliniger Kante bc zusammenstoßen. Auf dieselben wird eine größere Glastafel gelegt und längs der Geraden bc etwas mit dem Finger angedrückt; dadurch erhalten die 2 Spiegel eine geringe Verschiedenheit der Richtnng und zeigen im directen Sonnenlichte die farbigen Fresnel'schen Fransen. Fresnel schon hat dieselben auch durch Brechung mit einem sehr

Fig. 236.

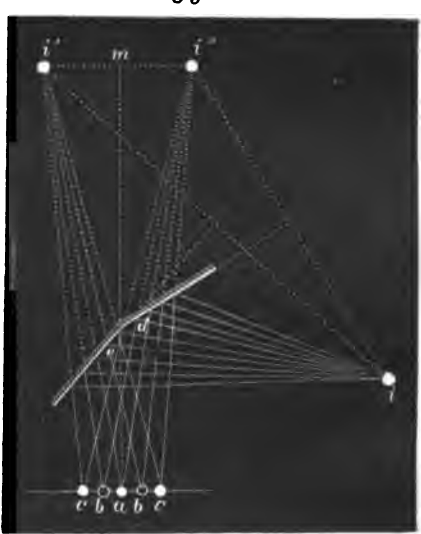


Fig. 237.

stumpfwinkeligen Biprisma hergestellt und (1862) Billet durch 2 auseinander gerückte Halblinsen und Fizeau durch 2 gegeneinander geneigte Glasplatten.

Aus der Gleichung $\beta = ly / x$ ergibt sich $l = \beta x / y$. Kennt man also die Breite der Streifen, die man mittels besonderer Vorrichtung messen kann, sodann den Abstand x der beiden Bilder und den Abstand y des Schirmes, so läßt sich die Wellenlänge l des betreffenden homogenen Lichtes berechnen. Dies ist die erste Methode zur Bestimmung der Wellenlängen der verschiedenen Farben und hieraus mittels der Formel $n = c/l$ der oft angeführten großen Schwingungszahlen (Fresnel 1818).

Das Auslöschen von Lichtstrahlen durch Interferenz scheint dem Princip der Erhaltung der Energie zu widersprechen; jedoch bewies Fresnel aus seinen (1818) aufgestellten Formeln, daß die Gesammtintensität der hellen und dunkeln Streifen gleich der des auftreffenden Lichtes ist, daß also die Auslöschung durch Verstärkung compensirt wird. — Wrede erklärte (1835) die Absorption durch Interferenz, eine Erklärung, die indeß derjenigen durch Uebertragung der Aetherschwingungen an die Körpermoleküle weichen mußte. Zu den Interferenzen gehören auch die **Schillerfarben**, wie z. B. die der Perlmutter und die der **Irisknöpfe**. Schillernde Körper haben eine äußerst fein geriefte Oberfläche. Die auftreffenden Lichtstr. werden nun sowohl von den Riefen wie von den Rinnen reflectirt; die von den letzteren reflectirten Str. sind in der Phase gegen die ersteren zurück; diejenige Farbe, für welche der Phasenunterschied gerade ½ Wellenlänge beträgt, wird aufgehoben, andere werden verstärkt; die Folge ist, daß weißes Licht farbig zurückgeworfen wird. Verändert man die Richtung der schillernden Oberfläche, so ändert sich auch die Richtung der reflectirten Str., sie können jetzt schiefer oder weniger schief gegen die Oberfläche stehen; folglich wird der Wegüberschuß des Rinnenstrahles gegen den Riefenstrahl vergrößert oder verkleinert, er wird jetzt gleich ½ Wellenlänge einer anderen Farbe sein, andere Farben als vorher werden aufgehoben und ebenso andere verstärkt; folglich muß eine Farbenänderung eintreten. Als Brewster Perlmutter in Siegellack abdrückte, zeigte dessen Oberfläche einen Perlmutterschiller. Die Irisknöpfe enthalten feine Riefensysteme von verschiedenen Richtungen, geben daher verschieden Farben.

369 **Die Farben dünner Blättchen** (Hooke 1665). **Newtons Farbenringe** (Newton 1673). Alle durchsichtigen Körper erscheinen im reflectirten und im durchgelassenen Lichte farbig, wenn sie hinreichend dünne Schichten bilden; die Farben ändern sich mit der Dicke der Schichten. Am bekanntesten sind die Erscheinungen an Seifenblasen, an dünnen Oelschichten, die sich auf Wasser ausbreiten, an alten Fensterscheiben, an den Oxydrinden der Metalle, wie z. B. am angelaufenen Stahl, an bis zum Zerspringen aufgeblasenen Glaskugeln, an der Haut, die schmutziges Wasser überzieht, an Sprüngen in Glas und Krystallen, die dünne Luftschichten bilden. Hooke erhielt die Lamellenfarben in Form von Ringen, indem er zwei schwach gekrümmte Glaslinsen auf einanderlegte und so eine nach außen allmälig dicker werdende ringförmige Luftlamelle herstellte. Newton machte diese Lamelle regelmäßig und der Messung zugänglich, indem er auf eine ebene Glastafel eine Linse von sehr schwacher Krümmung (40—60′ Radius) legte. Newton wandte auch bei diesem Versuche homogenes Licht an und erhielt so abwechselnde farbige und dunkle Ringe, die einen dunkeln Fleck umschließen. Dadurch fand er die Gesetze der Erscheinung: Die Dicken der Luftschicht stehen an den hellen Stellen im Verhältnisse von 1 : 3 : 5 : 7 ..., an den dunkeln Ringen im Verhältnisse von 0 : 2 : 4 ....; die Durchmesser der hellen Ringe verhalten sich wie die Quadratwurzeln der ungeraden, die der dunkeln Ringe wie die Quadratwurzeln der geraden Zahlen. Bei verschiedenem homogenem Lichte sind die Breiten der hellen Ringe verschieden, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Mit weißem Lichte erscheint der dunkle Fleck von verschiedenfarbigen Ringen umgeben, welche Newton in mehrere Ordnungen theilte: 1te Ordnung: Blau, Gelb, Weiß, Roth; 2te Ordnung: Violett, Blau, Grün, Gelb, Roth; 3te Ordnung: Purpur, Blau, Grün, Gelb, Roth; dann folgen fortwährend Grün und Roth.

Young gab 1802 die Erklärung dieser Erscheinungen nach der Wellentheorie. Die auf das dünne Blättchen treffenden Lichtstr. werden an der oberen und an der unteren Fläche desselben reflectirt; die von beiden Flächen reflectirten Str., welche auf einander oder direct neben einander fallen, müssen sich durch Interferenz bald aufheben, bald verstärken, je nachdem die von der unteren Fläche reflectirten Str. mit den oberen in gleicher oder entgegengesetzter Phase sind, was von der Dicke der Schicht abhängt. Hierbei ist aber noch zu be-

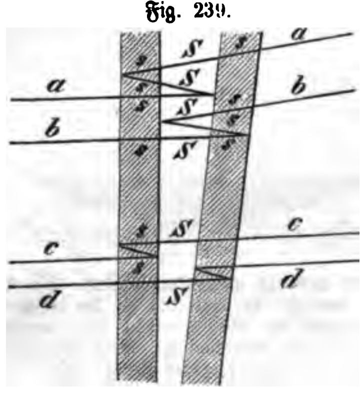
ichten, daß die eine Reflexion an einem festen Körper, die andere an Luft stattfindet, daß ilso bei der ersten Reflexion das neue Medium dichter als das alte ist, und daß deßhalb iach 231. die reflectirte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben ß, was bei der Reflexion an Luft nicht stattfindet. Wo sich die Platte und die Linse direct erühren, in a (Fig. 238) wird Licht an der Unterfläche bc der Linse, d. i. an Luft reflectirt, iber auch an der Oberfläche de der Platte, also an Glas. Obwohl nun die Ausgangs-unkte der beiden reflectirten Str. (in a) zusammenfallen, so ist doch der letztere Str. gegen en ersteren um eine halbe Wellenlänge zurück, weil der letztere bei der Reflexion um eine albe Wellenlänge verschoben ist, der erstere aber nicht; folglich müssen sich an der Berüh-ungsstelle die beiden Str. einander aufheben: es muß ein dunkler Fleck bei a entstehen; uch bei Seifenblasen sieht man an den dünnsten Stellen kurz vor dem Zerspringen dunkle Flecke. Wenn aber bei f die Dicke der Luftschicht fh oder die Entf. der beiden reflectirenden Flächen on einander $^1/_4$ der Wellenlänge, z. B. des othen Lichtes beträgt, so muß der Str., der n der unteren Fläche reflectirt wird, den Weg h zweimal zurücklegen, um wieder mit dem Str. gh zusammenzutreffen; er ist deßhalb um $/_2$ Wellenlänge von hg verschieden, und da er wegen Reflexion an einem dichteren Medium m noch $^1/_2$ Wellenlänge verschieden ist, so be-trägt sein totaler Phasenunterschied eine ganze Wellenlänge; der Str. fh muß hg verstärken, s muß hier Helligkeit stattfinden. Dasselbe wird der Fall sein, wo die Dicke der Schicht $/_4$, $^5/_4$, $^7/_4$ . . . einer Wellenlänge beträgt; da-er verhalten sich die Dicken der Schichten an en hellen Stellen wie die ungeraden Zahlen,

Fig. 238.

und die Durchmesser der hellen Ringe wie die Wurzeln aus den ungeraden Zahlen. Wenn weiter bei i die Dicke der Luftschicht $^2/_4$ Wellenlänge beträgt, so wird der an der Unter-fläche reflectirte Strahl um $^4/_4$ = 1 Wellenlänge gegen den oberen zurück sein wegen es zweimal durchlaufenen Weges ik; außerdem ist er wegen Reflexion an einem dichteren Medium um noch $^1/_2$ Wellenlänge verschieden; der totale Phasenunterschied beträgt daher $^3/_2$ Wellenlängen, es findet hier Lichtaufhebung statt. Dasselbe geschieht, wo die Dicke der Luft-schicht $^4/_4$, $^6/_4$ . . . Wellenlängen groß ist; daher verhalten sich die Dicken der Luftschichten n den dunkeln Stellen wie die geraden Zahlen, und die Durchmesser der dunkeln Ringe wie die Wurzeln aus den geraden Zahlen. — Da für violettes Licht wegen seiner kleineren Wellenlänge der Punkt f, wo die Dicke fh gleich $^1/_4$ Wellenlänge ist, näher an a liegt als ür rothes Licht, und da Analoges für i gilt, so müssen die Durchmesser der Ringe und da-er auch die Breiten der Ringe für violettes Licht kleiner sein, als für rothes, und müssen ür die übrigen Farben allmälig vom Roth nach dem Violett hin abnehmen. Nimmt man aher weißes Licht, so werden direct neben dem dunkeln Flecke die violetten und blauen Ringe sich zu einem bläulichen Weiß mischen, dann wird durch Zumischung von Gelb, Grün nd Orange, Weiß und dann Gelb entstehen, welches wegen allmälig schwindendem Blau nd dann auftauchendem Roth dieser Farbe weichen muß. — Im durchgelassenen Lichte er-cheinen bei Anwendung homogenen Lichtes dunkle Ringe, wo im reflectirten helle stehen und mgekehrt; bei Anwendung weißen Lichtes sind die Ringe im durchgelassenen Lichte comple-nentär zu denen im reflectirten Lichte; doch sind die Erscheinungen viel matter als in re-lectirtem Lichte. Die Umkehrung der Erscheinung erklärt sich folgendermaßen: Geht ein Theil des Strahlenbündels li bei m durch die untere Platte, so trifft es zusammen mit inem anderen Theile, der bei i und bei k reflectirt wurde, der also ebenfalls gegen den rsten Theil um $^4/_4$ Wellenlängen zurück ist; dieser zweite Theil ist aber außerdem zweimal on einem dichteren Medium reflectirt worden, hat also noch 2mal eine Verschiebung um $/_2$ Wellenlänge erfahren; folglich ist das durchgelassene Licht immer um $^1/_2$ Wellenlänge egen das reflectirte verschieden; was bei dem letzteren ausgelöscht wird, wird bei ersterem erstärkt, und umgekehrt. — Hier bietet sich eine schon von Young (1804) benutzte **zweite Methode zur Bestimmung der Wellenlängen** der verschiedenen Farben und der Schwingungszahlen dar. Man kann nämlich aus der bekannten Krümmung der Linse und us den Radien af, ai . . . . der Ringe die Dicken hf, ki . . . . der Luftschichten berech-en. Diese Dicken sind aber $^1/_4$, $^3/_4$ . . . . der Wellenlängen des angewandten homogenen ichtes, woraus diese Wellenlängen selbst leicht zu finden sind; so ergeben sich abermals die ft angeführten Schwingungszahlen und zwar in derselben Größe wie bei Fresnels Spiegel-ersuch. — Aus den Farben dünner Blättchen erklären sich die Farben der Fischschuppen,

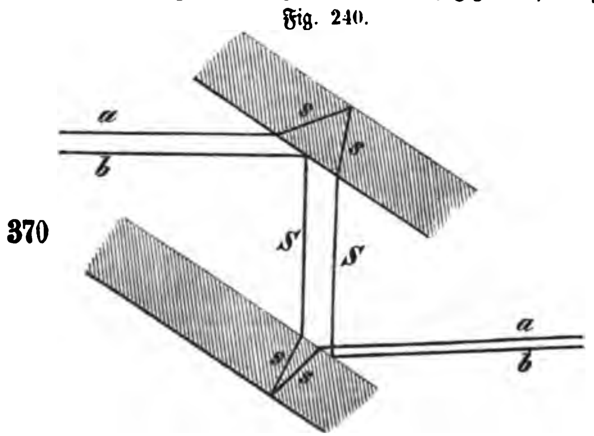
die Nobili'schen Farben auf Metallgefäßen und die anderen im Eingange dieses Capitels angeführten Farben. Fizeau benutzte (1866) die Lamellenfarben zum Studium der Ausdehnung der Krystalle durch Wärme. Clausius erklärte (1849) das **Himmelblau** durch die dünnen Häutchen der in der Luft schwebenden Wasserbläschen, die im reflectirten Lichte bei größter Dünne das Blau erster Ordnung erzeugen, dem durchgelassenen Lichte aber das complementäre Orange überlassen und dadurch das Morgen- und Abendroth, sowie die rothe Färbung von Sonne und Mond am Horizont hervorbringen. Brücke zeigte (1852), daß alle trüben Medien durch Interferenz im reflectirten Lichte vor einem dunkeln Hintergrunde blau, vor einem hellen, also im durchgelassenen Lichte roth erscheinen. Ein trübes Medium ist nach Brücke ein durchsichtiger Körper, der Theilchen eines anderen Mediums enthält, in welchem sich das Licht schneller oder langsamer fortpflanzt; das in ein solches Theilchen eindringende Licht wird an der vorderen und hinteren Fläche reflectirt und durch diese Reflexion allein ausgelöscht; wären die Theilchen unendlich klein, so würde das trübe Medium dunkel erscheinen. Wenn sie aber an diese Kleinheit nur grenzen, so wird nicht alles Licht verlöscht, es bleibt im reflect. Lichte Violett, Blau, Grün zurück, die sich zu Blau vereinigen, während dem durchgehenden Lichte das complementäre Orange bleibt (**Goethes Urphänomen**).

Fig. 239.



Auch **dicke Platten** können Interferenzstreifen bilden, wenn sie Lichtstr. so refl., daß refl. Str. mit verschiedenen Phasendifferenzen an verschiedenen Stellen auf einander fallen. Wird eine genau parallel geschliffene Spiegelglasplatte in 2 Platten zerschnitten und werden dieselben unter sehr kleinem Winkel gegen einander geneigt aufgestellt (Fig. 239), so sieht man nach Brewster (1817) Interferenzstreifen, wenn man durch das Plattenpaar nach einer schmalen Lichtquelle sieht. Denn bei paralleler Entf. S der Platten legen die Str. a und b zwischen den Außenflächen der Platten, wenn deren Dicke = s ist, die Wege 4 s + 3 S zurück, und die Str. c und d die Wege 4 s + S; sind die Platten jedoch wenig geneigt, so ist der Weg von a etwas verschieden von dem Wege von b, und ebenso haben c und d dann einen Phasenunterschied, der dem von a und b nicht ganz gleich ist; hierdurch sind die Bedingungen der Interferenz erfüllt. — Jamin (1857) erhielt starke Interferenzstreifen bei einer großen Entf. der zwei gegen einander schwach geneigten Platten; die Erklärung derselben gibt ein Blick auf Fig. 240; bei paralleler Plattenstellung sind die Wege von a und b = 2 s + S, bei etwas geneigter entsteht ein Phasenunterschied. Auf dieser Interferenz beruht Jamins **Interferenzrefractor** und **Compensator**, welche zur Bestimmung von B.-E. mit großer Genauigkeit z. B. von Gasen und anderen Studien Anwendung fanden (Kettler 1856).

Fig. 240.



370

Die Beugung oder Diffraction des Lichtes (Grimaldi 1665, Fresnel 1826, Schwerd 1835). Unter Beugung versteht man die mit Interferenz verbundene Ablenkung des Lichtes hinter den Rand undurchsichtiger Körper, wo sich durch Interferenz dunkele und helle Streifen bilden. Grimaldi fand schon, daß das Sonnenbildchen in der optischen Kammer etwas größer ist, als es nach der geometrischen Construction sein sollte und daß dasselbe von schwachen farbigen Ringen umgeben ist. Newton ließ homogenes Licht durch einen schmalen Spalt eintreten und fand, daß zu beiden Seiten des Lichtstreifens dunkle und helle Streifen von

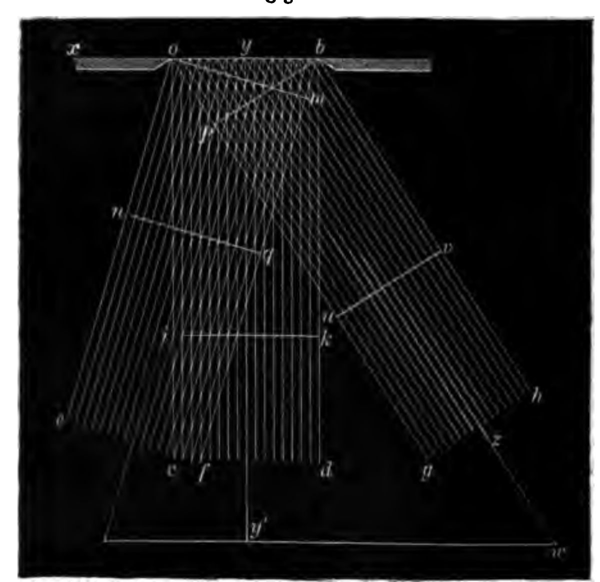
leicher Farbe auftreten, die sich nach beiden Seiten allmälig verlieren. Bei rothem ichte sind wieder die Streifen am breitesten, beim violetten am schmälsten; auch rscheinen sie breiter, wenn der Spalt dünner wird. Im Sonnenlichte stehen zu eiden Seiten des Spaltes wieder farbige Streifen. Fresnel hat auf Grund der Wellentheorie eine mathematische Erklärung der Beugungserscheinungen gegeben; Fraunhofer und Schwerd haben dieselbe auf einfache und zusammengesetzte Oeff-ungen von den verschiedensten Formen ausgedehnt und die Art der Beugungs-rscheinungen oft eher durch Rechnung gefunden als durch den Versuch, der dann mmer das Resultat der Rechnung bestätigte.

Die Anordnung der Versuche kann verschieden sein: Man läßt durch einen Spalt im Fensterladen Sonnenlicht oder durch einen Spalt in einer ein Lampenlicht umgebenden unkeln Blechröhre dieses Licht in ein dunkles Zimmer treten, läßt dieses Bündel durch den parallelen Spalt eines Schirmes gehen und fängt nun das Bündel auf einem zweiten, weit ntfernten Schirme auf; auf diesem erscheint dann das Bild des Spaltes und zu beiden Seiten helle und dunkle Streifen, wenn man das Licht durch Einschalten von Glastafeln der Flüssigkeiten homogen gemacht hat; dagegen erscheinen verschiedenfarbige Streifen, wenn as Licht heterogen ist. Fraunhofer setzte den zweiten Spalt oder die beugende Oeffnung berhaupt vor das Objectiv eines Fernrohres und sah mit demselben nach dem ersten Spalte hin. Schwerd benutzte als Lichtquelle den hellen Punkt in einem geschwärzten Uhr-lase oder einem Metallknopfe oder die Lichtlinie in einem inwendig geschwärzten Röhrchen nd sah einfach mit der Beugungsöffnung gegen diese Lichtquellen hin; die Oeffnungen nüssen aber dann sehr fein sein und können durch auf einander gelegte Stanniolblättchen, ie feine Einschnitte tragen, vielerlei Formen erhalten. Ist die beugende Oeffnung ein Parallelogramm, so erscheint dieselbe von zahlreichen hellen Parallelogrammen nach allen Richtungen umlagert; durch eine dreieckige Oeffnung sieht man einen sechsstrahligen Stern. Durch zwei parallele Spalte erscheint ein Bild fast wie bei einem Spalt, nur ist es von ahlreichen dunkeln, dicken Linien nach der Breite durchzogen. Ebenso erscheint durch 2 kreis-förmige Oeffnungen das Bild wie durch einen Kreis, nur ist es von dunkeln Strichen senk-recht zur Verbindungslinie der beiden Oeffnungen durchzogen; durch 4 Oeffnungen erscheinen noch mehr dunkle Linien senkrecht zu den vorigen, so daß das ganze Bild wie von einem Quadrat-Gitter überlagert ist. Durch ein Stabgitter sieht man bei homogenem Lichte eine elle Mittellinie und mehrere seitliche gleiche Linien in verschiedenen Abständen; bei violettem iegen sie näher an der Mitte als bei rothem Lichte; bei Anwendung weißen Lichtes erscheinen u beiden Seiten der Lichtlinie Spectra, regelmäßiger als die prismatischen, sogar die Fraun-hofer'schen Linien zeigend. Zwei gekreuzte Gitter geben ein prächtiges Bild, in welchem ein eller Punkt nach allen Richtungen von Spectren umlagert ist.

371 **Erklärung der Beugung.** Um die Beugungserscheinungen wenigstens für den ein-achsten Fall, für einen Spalt abzuleiten, müssen wir die Interferenz zweier Str. für den Fall prüfen, wo der Phasenunterschied nicht eine gerade oder ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, sondern weniger oder mehr. Dafür benutzen wir 226.; dort fanden vir für die Schwingungsweite eines Atoms, das von 2 Wellen gleichzeitig erregt wird, die Formel $R = \sqrt{[r^2 + r_1^2 + 2rr_1, \cos 2\pi (a / l)]}$, worin r und r_1 die beiden Einzelamplitu-en, l die Wellenlänge und a der Abstand der beiden wellenerregenden Punkte in der Rich-ung des Str. sind. Da nun in einem beleuchteten Spalte die verschiedenen Punkte gleiche Intensitäten und daher bei homogenem Lichte auch gleiche Amplituden haben, so ist $r_1 = r$ nd daher $R = r \sqrt{[2 + 2 \cos 2\pi (a / l)]}$. Erinnern wir uns nun an das Huyghens'sche Princip (230.), so folgt für die Beugung aus demselben, daß von jedem Lichtpunkte in inem Spalte Lichtwellen, also auch Str. nach allen Richtungen ausgehen; es wird daher eder Punkt des Schirmes oder auch der Netzhaut von Str. aus allen Punkten des Spaltes etroffen, die man wegen der Größe der Entf. des Spaltes im Verhältnisse zu seiner Klein-eit als parallel ansehen kann. Es stellen demnach Fig. 241 obcd, obhg, obfe Strahlen-bündel für einzelne Punkte des Schirmes vor, deren Aetherschwingungen in ob, dem Quer-schnitte des Spaltes, sämmtlich von gleicher Phase sind. Innerhalb eines solchen Bündels können die Str. nur an den Stellen auf einander einwirken, die in einer Senkrechten zur Richtung des Str. liegen, weil die Aetherschw. senkrecht auf dem Str. stehen. Solche wirk-ame Stellen sind z. B. in dem Bündel obcd die Punkte von ik, in dem Bündel obfe die Punkte von om und nk, in dem Bündel obhg die Punkte von bp und uv. In ik sind lle Str. in gleicher Phase, in om und nq, sowie in bp und uv aber nicht. Der Phasen-unterschied hängt von der Länge von bm und von op ab, und diese Länge wird von der chiefen Richtung der Str. bedingt. Ist z. B. bm gleich 1/2 Wellenlänge, so haben je zwei eben einander liegende von den 16 Strahlenbündeln den Phasenunterschied $1/32\, l$. In un-

serer Formel für R bedeutet nun a den Abstand der beiden wellenerregenden Punkte in der Richtung des Str.; zwischen o und b ist der Abstand solcher zwei Punkte $^1/_{16}$ des Spaltes; der ganze Spalt auf den Str. projicirt, in der Richtung des Str. gemessen ist = bm = $^1/_2$ Wellenlänge; demnach ist a für 2 neben einander liegende Str. = $^1/_{32}$ l, überhaupt immer gleich dem Phasenunterschiede. Da in dem Bündel obcd der Phasenunterschied = o ist, so ist auch a = o; folglich ist R = 2r, d. h. die Str. wirken nur verstärkend auf einander; die Punkte, die von dem senkrechten Bündel getroffen werden, haben die größte Lichtstärke. Wo aber die Str. so schief auffallen, daß der Phasenunterschied der Randstr. wie in obfe eine halbe Wellenlänge beträgt, da ist a = $^1/_{32}$ l, daher $R = r\sqrt{[2 + 2 \cos (360/32)]} = r\sqrt{3,962} = 1,97\, r$. In diesem Bündel, dessen Str. auf einander einwirken, weil sie sich in einem Punkte vereinigen, heben sich zwar die Randstr. einander auf, weil ihr Phasenunterschied $^1/_2$ l ist, aber die zwei mittleren, für welche der Phasenunterschied nur $^1/_{32}$ l ist, bringen zusammen nahezu die doppelte Wirkung eines einzigen hervor. Fassen wir die zwei zu beiden Seiten der zwei mittleren ins Auge, deren a = $^3/_{32}$ l, so ergibt sich $R = r\sqrt{3,663} = 1,91\, r$; und so ergibt sich die Wirkung zweier immer mehr nach dem Rande zu gelegenen Str. immer kleiner, bis sie für die 2 Randstr. endlich = Null ist. Wenn nun auch die Wirkung des Bündels obfe nicht derjenigen von obdc gleich ist, so ist doch immer noch eine sich hinter den Rand xo fortpflanzende Lichtwirkung vorhanden; das Bild des Spaltes breitet sich weiter aus, als es dem Mittelbündel, der geom. Constr. entspricht; diese Ausbreitung nimmt aber an Lichtstärke allmälig ab. Wie weit sie geht, wird sich sogleich, bei der Betrachtung

Fig. 241.



des Bündels obhg zeigen, dessen Richtung so schief ist, daß der Gangunterschied op der Randstr. eine ganze Wellenlänge beträgt.*) Hieraus folgt sogleich, daß der Gangunterschied des Mittelstrahles yz und des Randstr. bh $^1/_2$ Wellenlänge ausmacht, daß sich also diese beiden aufheben; dasselbe geschieht aber auch mit dem ersten Str. links von yz und links von bh, weil ihr Gangunterschied ebenfalls $^1/_2$ l ist, und ebenso mit dem zweiten Str. links von yz und von bh; kurz zu jedem Str. ist ein anderer vorhanden, der ihn auslöscht, weil ihr Phasenunterschied $^1/_2$ Wellenlänge ist. Der Punkt seitlich von dem Bilde des Spaltes, auf den das Bündel obhg fällt, ist also dunkel; zu beiden Seiten des verbreiteten Spaltbildes entstehen dunkle Streifen, in die sich das Bild allmälig verläuft. — Gehen wir nun zu dem (in der Figur nicht mehr gezeichneten) Bündel über, dessen Randstr. $^3/_2$ Wellenlängen Phasenunterschied haben, so läßt sich dasselbe leicht in 3 Bündel zerlegen; der erste Str. des ersten Theilbündels und der erste des zweiten sind um $^1/_2$ l verschieden, heben sich daher auf, ebenso die zwei zweiten Str., die zwei dritten u. s. w.; kurz zwei dieser Theilbündel heben sich auf, und es bleibt noch das dritte übrig, dessen Randstr. um $^1/_2$ l verschieden sind, und das deßhalb den dritten Theil der Wirkung von obfe ausübt. Folglich stehen zu beiden Seiten der dunkeln Streifen zwei helle Streifen, die allmälig in die dunkeln übergehen. Weitere Betrachtung ergibt, daß in ähnlicher Weise dunkle und helle, aber immer schwächer werdende Streifen mit einander abwechseln. — Je feiner der Spalt ist, desto schiefer muß die Richtung eines Bündels werden, damit der Phasenunterschied seiner Randstrahlen um $^1/_2$ Wellenlänge wachse; die Streifen werden demnach um so breiter, je dünner der Spalt

*) In der Figur ist der Deutlichkeit wegen die Schiefe der zwei in Betracht gezogenen [illegible]ndel bedeutend übertrieben.

ist. Ebenso muß die Richtungsänderung des Bündels um so größer für die Erzielung dieses Phasenunterschiedes sein, je größer die Wellenlänge des Lichtes ist; folglich hat das rothe Licht die breitesten Streifen. — Bei der Anwendung weißen Lichtes muß an der Stelle, wo für Roth der erste dunkle Streifen steht, für Violett und Blau schon ein heller vorhanden sein, weil für diese der Phasenunterschied von 3/2 Wellenlänge durch dieselbe Schiefe des Bündels schon erreicht ist, die bei dem rothen Lichte kaum einen Unterschied von 1 Wellenlänge erzeugt; wo also Blau und Violett verlöscht sind, müssen Grün und Roth vorhanden sein. Bei Anwendung von weißem Lichte entstehen also farbige Streifen zu beiden Seiten des weißen Bildes. Violett grenzt übrigens nicht direct an das weiße Spaltbild; denn auch in diesem ist der rothe und gelbe Bestandtheil breiter als die übrigen; Violett und Blau sind schon an Stellen verlöscht, wo Roth, Gelb und Grün noch vorhanden sind; das weiße Bild geht also durch Gelb und Roth in Blau über, auf welches dann die Farben der Newton'schen Ringe folgen. — Hier begegnet uns ein drittes Mittel, die Schwingungszahlen zu bestimmen; es findet nämlich in Fig. 241 wegen der Aehnlichkeit der Dreiecke obp und ywy' folgendes Verhältniß statt: yy' : y'w = bp : op. Hierin ist bekannt yy', der Abstand des Schirmes vom Spalte, y'w das halbe Mittelbild bis zur Mitte des ersten dunkeln Streifens, bp ohne merklichen Fehler gleich der Breite des Spaltes; hieraus läßt sich die Unbekannte op, die Wellenlänge, und aus dieser die Schwz. finden.

Ein besonderes Interesse bietet noch die Beugung durch ein Stabgitter, das aus vielen parallelen Spalten zusammengesetzt ist. Schon durch zwei Spalte entstehen starke dunkle Striche, selbst in dem Hauptbilde des Spaltes, weil in dasselbe die Str. aus beiden Spalten eindringen, die an einzelnen Stellen um 1/2 Wellenlänge verschieden sind und sich so einander aufheben. Die schwarzen Linien vermehren sich mit der Zahl der Spalte und fließen endlich bei einem Gitter zu breiten, dunkeln Feldern zusammen, zwischen denen bei homogenem Lichte nur einzelne helle Linien stehen bleiben, von welchen die Mittellinie die hellste ist. Wie nun in dem Beugungsbilde eines Spaltes zunächst an dem Hauptbilde das Violett an Stellen wieder auftaucht, an denen das Roth noch verlöscht ist, so stehen auch in dem Beugungsbilde mehrerer Spalte oder eines Gittes bei blauem Lichte die hellen Seitenlinien der Mittellinie näher als bei dem rothen Lichte. Wird daher weißes Licht benutzt, so müssen dem Mittelbilde zunächst die violetten Theile stehen, denen die übrigen sich gleichmäßig anschließen. Es entstehen daher beiderseits Spectra von homogenen Farben, die sich öfter wiederholen, anfänglich durch dunkle Felder getrennt sind, aber später sich theilweise decken. Diese Spectra werden um so reiner und deutlicher, je größer die Zahl der Spalte wird und je feiner dieselben sind; bei hinlänglicher Feinheit lassen sich sogar die Fraunhofer'schen Linien erkennen. Diese Beugungsspectra sind dadurch vor den prismatischen Sp. ausgezeichnet, daß die Ausdehnung der 7 Farben ziemlich gleich ist, während bei der Brechung die rothen Str. zusammengedrängt und die violetten aus einander gedehnt werden. — Aus der Entf. der hier auftretenden Fraunhofer'schen Linien von dem Mittelbilde, dem Abstande des Schirmes vom Gitter und dem Abstande zweier Spalte ergibt sich eine vierte Methode, die Schwingungszahlen zu berechnen (Fraunhofers Methode 1823; Eisenlohr (1856) fand nach dieser sogar die Wellenlänge des äußersten Ultraviolett = 0,000 355mm).

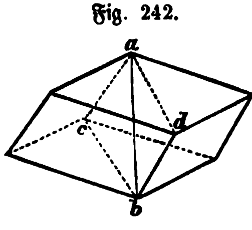
Aus der Beugung erklären sich die Farben, die man beim Augenzwinkern gegen Lichtpunkte sieht, die Farben, die durch Musselin, Flor und andere Zeuge, sowie durch die Flügel- und Schwanzfedern kleiner Vögel gesehen werden können, wenn man durch diese Gegenstände nach hellem Lichte blickt. Prächtige Erscheinungen geben die Nobert'chen Glasgitter, besonders die Kreuzgitter. Auch die Spinnweben, die feinen Haare der Wolle, der Seide u. s. w. zeigen im Sonnenscheine Beugungsfarben. Bestreut man eine Glastafel mit Hexenmehl, so erscheint ein durch dieselbe betrachtetes Licht mit einem Kreise von Beugungsfarben umgeben; ebenso das Spiegelbild eines Lichtes in einem dunstbehauchten Fenster. Man erklärt auch die kleinen Höfe um Sonne und Mond durch Beugung der Lichtstr. an den Rändern der Nebelbläschen.

Die doppelte Brechung des Lichtes (Bartholin 1669, Huyghens 1691). Unter **372** der doppelten Brechung versteht man die Eigenschaft vieler durchsichtigen Körper, einen eindringenden Lichtstrahl in zwei Strahlen zu zerlegen und beide Bestandtheile von der ursprünglichen Richtung abzulenken. Diese Eigenschaft zeigen die Krystalle aller Systeme mit Ausnahme der des regulären, sowie gepreßte und ungleichmäßig erwärmte und abgekühlte Gläser. Bei den Krystallen des quadratischen und des hexagonalen Systems befolgt der eine der beiden gebrochenen Strahlen die Gesetze der einfachen Brechung und heißt deshalb der gewöhnliche Strahl; der andere befolgt diese Gesetze nicht, geht aus der Einfallsebene, hat in verschiedenen Richtungen einen verschiedenen Brechungsexponent und weicht daher bald mehr, bald weniger von dem gewöhnlichen Strahle ab; er heißt deshalb der ungewöhnliche

Strahl. In vielen dieser Krystalle wird der ungewöhnliche Strahl weniger gebrochen als der gewöhnliche; sie werden negative Krystalle genannt; zu ihnen gehören Kalkspath, Turmalin, Beryll, Saphir, Rubin; von Salzen Kalisalpeter, Nickelsulfat. In anderen Krystallen, positive genannt, wird der ungewöhnliche stärker als der gewöhnliche gebrochen; solche sind Bergkrystall, Zirkon, Eis, Zinnstein, Apophyllit. Sämmtliche doppelt brechende Krystalle haben indeß auch Richtungen, in denen nur einfache Brechung stattfindet; man nennt diese Richtungen optische Achsen. Die Krystalle des quadratischen und des hexagonalen Systems sind optisch einachsig, haben nur eine optische Achse, welche mit der krystallographischen Hauptachse zusammenfällt. Die Krystalle des rhombischen, des klinorhombischen und des klinorhomboidischen Systems dagegen sind optisch zweiachsig, sie haben zwei Richtungen, in denen einfache statt doppelter Brechung stattfindet. Diese zwei Achsen haben die verschiedenste Neigung gegen einander, z. B. beim Natronsalpeter 5°, beim Gyps 57°, beim Feldspath 64°, beim Eisenvitriol 90°, und stehen nicht in einfacher Beziehung zu den krystallographischen Achsen. In den zweiachsigen Krystallen gibt es keinen gewöhnlichen Strahl, die Ausdrücke neg. und pos. haben eine andere Bedeutung (382.).

Die einfachste Erscheinung der doppelten Brechung zeigt besonders deutlich der isländische Doppelspath, der im Rhomboeder (Fig. 242) krystallisirt. Legt man ein solches durchsichtiges Rhomboeder auf ein weißes Blatt mit einem schwarzen Punkte, so sieht man diesen doppelt; Gegenstände durch ein Kalkspathprisma betrachtet erscheinen zweimal; dringt ein Lichtbündel durch eine Oeffnung eines auf demselben liegenden Kartenblattes, so sieht man dasselbe sich spalten. Werden die zwei stumpfen Ecken a und b eines Rhomboeders senkrecht zu ihrer Verbindungslinie weggeschliffen und wird der Krystall mit einem dieser Schnitte auf einen Punkt gelegt, so erscheint dieser nur einfach; der Str. hat jetzt die Richtung der optischen Achse ab. Betrachtet man dagegen durch diese zwei Schnitte einen seitlich stehenden Gegenstand, so erscheint er wieder doppelt, doch liegen beide Bilder nach der Richtung des Gegenstandes; dasselbe ist auch der Fall, wenn der Krystall so geschliffen ist, daß seine Oberfläche der optischen Achse ab parallel ist; in allen anderen Fällen erscheint das eine Bild außerhalb der Verbindungslinie des anderen mit dem Gegenstande, woraus zu ersehen ist, daß in den meisten Fällen der eine gebrochene Str. aus der Einfallsebene tritt. Schleift man ein Kalkspathprisma so zurecht, daß die brechende Kante der optischen Achse parallel ist, so findet man die B.-E. der beiden Str. = 1,654 und 1,483; für Prismen, die eine andere Richtung der brechenden Kante zur optischen Achse haben, findet man den B.-E. des am meisten abgelenkten Str. immer = 1,654 und den des anderen Str. größer als 1,483. Ein Prisma, dessen brechende Kante auf der optischen Achse senkrecht steht, ergibt beim symmetrischen Durchgange nur einen gebrochenen Str. vom B.-E. 1,654; durch ein solches Prisma sieht man bald ein, bald zwei Bilder, je nachdem man die Str. senkrecht oder schief gegen die Achse auftreffen läßt. Ein Quarzprisma ergibt für den am wenigsten abgelenkten Str. immer den B.-E. 1,548, während der des mehr abgelenkten zwischen 1,548 und 1,558 liegt; den letzten findet man, wenn man den Str. senkrecht zur Achse durch zwei Flächen eines Bergkrystalls gehen läßt.

Fig. 242.

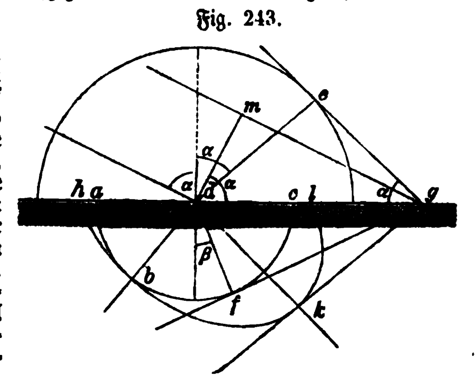


373 Zur Erklärung der doppelten Brechung muß auf die Entstehung der Krystalle zurückgegangen werden. Bei den Krystallen des regulären Systems sind die Hauptdimensionen einander gleich; es mußte folglich bei der Entstehung in allen Richtungen eine gleich starke Anlagerung stattgefunden haben, es mußte die Anziehung des ersten Krystallkernes und des wachsenden Krystalls nach allen Richtungen gleich groß sein; folglich mußten sich die Mol. nach allen Richtungen in gleicher Dichte anlagern, wodurch auch der Aether nach allen Richtungen dieselbe Dichte erhielt. Bei den Krystallen des quadratischen und des hexagonalen Systems mußte in der Richtung der Hauptachse ein stärkeres oder schwächeres Anwachsen stattfinden als in den dazu senkrechten Richtungen, in welchen wegen der Gleichheit der Dimensionen ein gleiches Anwachsen vorausgesetzt werden muß; folglich muß die Dichte des Aethers in der Richtung der Hauptachse größer oder kleiner sein als in den dazu senkrechten Richtungen, in welchen eine gleiche Aetherdichte stattfinden muß. Endlich ergibt sich auf ähnliche Weise, daß für die übrigen Krystallsysteme der Aether nach allen drei Di-

mensionen eine verschiedene Dichte besitzt. Setzen wir nun voraus, daß die Elasticität des Aethers überall dieselbe ist, so folgt zunächst, daß in dem regulären System das Licht sich nach allen Richtungen mit gleicher Geschw. fortpflanzt, bei den zwei folgenden Systemen nach der Hauptachsenrichtung mit größerer oder kleinerer Geschw. als in den dazu senkrechten Richtungen, und bei den drei letzten Systemen in allen drei Richtungen mit verschiedener Geschw.: das Lichtmedium ist nur im regulären System isotrop, in allen anderen Systemen anisotrop. Im Kalkspath z. B. ist die Aetherdichte in der Richtung der Hauptachse größer als in den dazu senkrechten Richtungen, das Licht pflanzt sich daher in der ersten Richtung nach der Fl. $c = \sqrt{(e / d)}$ langsamer fort als in den letzteren, in welchen übrigens hier die Geschw. gleich groß sind. Langt daher ein Lichtstr. in der Richtung der Hauptachse an, so können sich seine Schw., da sie in der Richtung der Hauptachse fortschreitend immer auf Aether von derselben Dichte treffen, mit unveränderter Geschw. fortpflanzen wie in einem isotropen Medium: es findet einfache gewöhnliche Brechung statt. Hat jedoch der Str. eine andere Richtung, so findet das Fortschreiten jeder Schw. nicht nur in der Richtung der Hauptachse, sondern auch in anderen Richtungen statt; selbst wenn der Str. senkrecht zur Hauptachse steht, gibt es in ihm Schw., die schief gegen dieselbe gerichtet sind, da die Schw. nach allen zum Strahle senkrechteu Richtungen vor sich gehen. Da nun das Fortschreiten der Schw. in der Richtung der Hauptachse mit geringerer Geschw. stattfindet als in allen anderen Richtungen, so muß jede Schw. in zwei Componenten zerlegt werden, von denen die eine in der Richtung der Hauptachse fortschreitet, also auf der Hauptachse senkrecht steht, während die andere auf der ersten senkrecht steht. In allen Fällen also, wo der Str. nicht die Richtung der Hauptachse hat, muß jede Schw. in zwei Schw. zerlegt werden, von denen eine auf der Hauptachse senkrecht steht. Diese Schw. steht nicht blos senkrecht auf der Hauptachse, sondern auch auf der Richtung ihres Str.: folglich steht sie auf der durch beide Linien bestimmten Ebene, dem Hauptschnitte abcd senkrecht; dies gilt natürlich von jeder Schw.; demnach sind alle Schw. des Str. einander parallel, der Str. ist polarisirt und zwar stehen seine Schw. auf dem Hauptschnitte senkrecht. Die zweite Componente einer jeden ursprünglichen Schw. muß zur ersten senkrecht sein, weil sie sonst noch eine zur ersten parallele Comp. enthielte; folglich muß jede zweite Comp. zum Hauptschnitte parallel sein, und, da sie ebenfalls auf ihrem Str. senkrecht steht, also auch auf der durch den Str. und die erste Comp. bestimmten Ebene, so müssen auch alle zweiten Componenten einander parallel sein; es ist daher der zweite Str. ebenfalls polarisirt und zwar senkrecht zu dem ersten.

Die aus den ersten Schwingungscomp. gebildeten Str. pflanzen sich in der Achsenrichtung, also immer nach Richtungen gleicher Aetherdichte fort; ihre Elementarwelle ist daher wie bei der gewöhnlichen Brechung eine Kugel abc (Fig. 245), deren Radius db gleich der kleineren Geschw. des Lichtes in der Achsenrichtung ist. Der Str. ist gewöhnlich gebrochen; denn der B.-E. ist immer gleich dem Radius de der Kugelwelle des alten Mediums dividirt durch den Radius df der Kugelwelle des neuen Mediums und daher constant, und die Brechungsebene fällt mit der Einfallsebene zusammen, weil die von einem Punkte g an beide Kugelwellen gezogenen Tangentialebenen gf und ge die beiden Kugeln in einer mit der Einfallsebene zusammenfallenden Ebene gef berühren. Die zweite Comp. der Schw. muß zwar auf der ersten senkrecht stehen und dem Hauptschnitte parallel sein, kann aber sehr verschiedene Richtungen haben, da die Schw. des ursprünglichen Str. nach allen nur denkbaren Rich-

Fig. 243.



ngen, auf demselben senkrecht stehen. Nun pflanzt sich aber jede Schw. in der zu ihr senkrechten ichtung fort; folglich sind die Fortpflanzungsrichtungen der Schw. auch unendlich zahlreich. ine von diesen Richtungen fällt wieder in die optische Achse, weil unter allen Richtungen, e auf einer zu einer Geraden Senkrechten senkrecht stehen, noch eine vorhanden ist, die auf r Geraden senkrecht steht. In dieser Richtung ist die Geschw. wieder gleich der kleinsten in r optischen Achse. In den nur wenig abweichenden Richtungen ist die Geschw. nur wenig ößer; sie nimmt aber zu mit der Abweichung von der optischen Achse, und ist in der erzu senkrechten Richtung am größten. Wenn wir daher die Punkte, in welchen die von nem Punkte ausgehende Schwingungsbewegung nach gleicher Zeit anlangt, verbinden, so tsteht keine Kugelwelle, sondern eine Sphäroidfläche hbkl (Fig. 243), welche die Kugelwelle der Richtung der optischen Achse von außen berührt und einschließt, weil in dieser Rich-

tung die betreffende Geschw. beiden gemein ist, in jeder anderen aber die zur Sphäroidfläche gehörige größer als die zur Kugelwelle gehörige ist. Stellt demnach db die optische Achse vor, so berührt die Sphäroidwelle hbkl die Kugelwelle abcf in b, und nach der bekannten Constr. ist df der gewöhnliche oder ordentliche und dk der außerordentliche Str. Leicht ist schon aus der Fig. zu ersehen, daß und warum der außerordentliche Str. weniger gebrochen ist als der ordentliche; es ergibt sich indeß auch aus der Betrachtung des B.-E. Derselbe ist für den außerordentlichen Str. gleich dem Radius de der alten Elementarwelle dividirt durch den Abstand dk; da dieser immer größer als db ist, so ist der B.-E. des außerordentlichen Str. immer kleiner als der des ordentlichen, der außerordentliche Str. wird weniger gebrochen als der ordentliche, wodurch sich der Name negative Krystalle erklärt; da derselbe von der optischen Achse mehr abweicht als der ordentliche, so ist auch der frühere Name repulsive Krystalle erklärlich. Weiter wird jetzt klar, warum der B.-E. des außerordentlichen Str. veränderlich ist; je nach der Richtung des einfallenden Str. ändert sich die Lage der Tangentialebene gk und dadurch der Nenner dk des Bruches, der den B.-E. angibt; der außerordentliche Str. ändert also seine Lage gegen den ordentlichen mit dem Einfallswinkel. Der B.-E. ist am größten (für Kalkspath = 1,654), wenn dk auf db fällt, wenn also der außerordentliche mit dem ordentlichen zusammen in die optische Achse fällt, und am kleinsten (für Kalkspath = 1,483), wenn dk seinen größten Werth hat, d. h. wenn der außerordentliche Str. auf der optischen Achse senkrecht steht; in allen anderen Fällen liegt bei Kalkspath der B.-E. zwischen 1,654 und 1,483, weil dk dann größer als db und kleiner als die zu db senkrechte Sphäroidachse ist. Im letzteren der angeführten Fälle liegt der außerordentliche Str. auch in der Einfallsebene, sowie überhaupt in den Fällen, die in der Fig. möglich sind, d. h. wenn die optische Achse in die Einfallsebene fällt, oder wenn die brechende Krystallfläche auf der optischen Achse senkrecht steht. In allen anderen Fällen berührt die Tangentialebene gk das Sphäroid außerhalb der Ebene der Fig., außerhalb der Einfallsebene, also tritt der außerordentliche Str. aus der Einfallsebene hinaus. So erklären sich die Erscheinungen der doppelten Brechung für alle negativen Krystalle. Bei Bergkrystall und anderen positiven Krystallen ist die Lichtgeschw. in der Achsenrichtung die größte; die Kugelwelle schließt dann die Welle der zweiten Comp. ein, welche in diesem Falle ein Umdrehungsellipsoid ist, d. i. eine solche Fläche, die durch Rotation einer Ellipse um ihre große Achse entsteht; hieraus ist leicht ersichtlich, daß der B.-E. des außerordentlichen Str. größer ist als der des ordentlichen.

Die Ebene des Hauptschnittes, auf welcher die Schw. des ordentlichen Str. senkrecht stehen, ist nach verschiedenen Beziehungen charakteristisch für diesen Str.; geht derselbe durch einen zweiten Krystall, dessen Hauptschnitt dem des ersten parallel ist, so geht derselbe als ordentlicher Str. weiter; bildet der zweite Hauptschnitt mit dem ersten einen immer größer werdenden Winkel, so geht der Str. immer weniger als ordentlicher durch den zweiten Krystall, und am wenigsten, wenn dieser Winkel ein rechter ist; ebenso ist bei gleichem Winkel die Intensität des aus dem zweiten Krystall tretenden ordentlichen Str. immer dieselbe. Wegen dieses charakteristischen Zusammenhanges des ordentlichen polarisirten Str. mit dem Hauptschnitte, auf welchem seine Schw. senkrecht stehen, nennt man dessen Ebene die Polarisationsebene des polarisirten Str.; ebenso nennen wir überhaupt die Ebene, auf welcher die Schw. eines polarisirten Str. senkrecht stehen, die *Polarisationsebene* desselben. Es ist übrigens noch ein Problem, ob die Schw. auf der Polarisationsebene senkrecht stehen oder derselben parallel sind. Manche Forscher, welche der letzteren Meinung zugethan sind, nennen demgemäß die Ebene, in welcher die Schw. des polarisirten Lichtes erfolgen, die Polarisationsebene, während nach unserer Ableitung diese Ebene, die *Schwingungsebene*, auf der Polarisationsebene senkrecht steht. Lommel hat (1879) einen experimentellen Beweis erbracht, daß die Schw. auf der Polarisationsebene senkrecht stehen; derselbe beruht auf der Fluorescenz des dichroitischen Magnesiumplatincyanürs. Ein dichroitischer Körper ist ein solcher, der von verschiedenen Seiten verschiedene Farben zeigt; so haben die Seitenflächen der quadratischen Säulenkrystalle des genannten Stoffes grünen, die Endflächen violettblauen Metallglanz; auch in durchgehendem Lichte zeigt er zwei Farben, indem der ordentliche Str. hell carminroth, der außerordentliche dunkel blutroth ist, was am deutlichsten durch Betrachtung mit Haidingers Lupe in die Augen springt; endlich zeigt er im polarisirtem Lichte auch zwei Fluorescenzfarben. Beleuchtet man seine vertical aufgestellte Grundfläche durch einen Nicol so mit horizontalem Lichtstrahlen, daß deren Polarisationsebene horizontal steht, während der Krystall um eine verticale Achse so gedreht wird, daß das polarisirte Licht seine Endfläche unter fortwährend wachsendem Einfallswinkel trifft, so erscheint er immer in unveränderter scharlachrother Fluorescenz; in diesem Falle also, wo die Farbe sich nicht ändert, bleibt die Normale der Polarisationsebene immer senkrecht zur Krystallachse. Wird dagegen der beleuchtende Nicol so gestellt, daß seine Polarisationsebene vertical steht, so geht bei der Drehung des Krystalls um eine verticale Achse die scharlochrothe Fluorescenz in Gelb über; in diesem Falle, wo die Farbe sich ändert, verändert sich der Winkel, den die Normale der Polarisationsebene mit der Krystallachse bildet. Was aber verändernd wirken kann, das ist

einzig die Schwingungrichtung des Lichtes; also muß die Schwingungsrichtung mit der Normalen der Polarisationsebene zusammenfallen. Fiele die Schwingungsrichtung in die Polarisationsebene, so müßte bei dem ersten Versuche die Farbenänderung eintreten, bei dem letzten aber nicht.

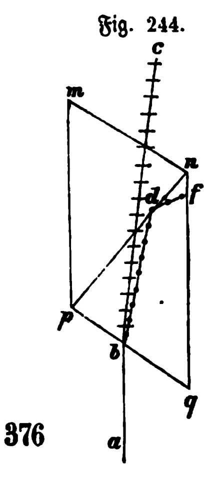
374 Die Erscheinungen der doppelten Brechung in optisch zweiachsigen Krystallen sind sehr verwickelt und nur der höheren Rechnung zugänglich. Sie wurden von Fresnel 1821 auf mathematischem Wege aus der Undulationstheorie abgeleitet und dann durch Versuche bestätigt, was diese Theorie zu kaum bestrittener Geltung brachte. Wie zur Constr. der Str. bei den einachsigen Krystallen eine Verbindung einer Kugelfläche mit einer ellipsoidischen nöthig ist, so bedarf es hier noch mehr verwickelter Verbindungen von Ellipsoiden, um die Wellenoberfläche für Str. nach jeder Richtung aufzustellen. Schnitte dieser Wellenfläche durch Ebenen bilden meist zwei Curven, manchmal eine Ellipse und einen Kreis. So ist der Schnitt durch die Richtung der größten und der kleinsten Geschw. eine Ellipse und ein Kreis, die sich einander in vier Punkten schneiden. Nach diesen Punkten gehen die optischen Achsen; da aber an diesen Schnittpunkten eine trichterförmige Vertiefung stattfindet, so trifft auf die gemeinsame tangirende Wellenfläche ein ganzer Strahlenkegel, der beim Austritte als eine Welle fortschreitet. Diese von Hamilton 1829 theoretisch gefundene Erscheinung der sogenannten inneren conischen Refraction wurde von Lloyd beim Arragonit bestätigt gefunden. An die inneren Punkte des Trichters gibt es umgekehrt viele Tangentialebenen, die sich sämmtlich dem Schnittpunkte zuueigen; folglich muß ein auf den Punkt von innen nach außen fortschreitendes Strahlenbündel sich beim Austritte in einen Kegel ausbreiten; diese äußere conische Refraction wurde ebenfalls von Hamilton theoretisch geschlossen und durch Lloyds Versuche bestätigt.

375 **Die Polarisation des Lichtes** (Malus 1808). Polarisirtes Licht ist solches Licht, dessen Schwingungen einander parallel auf dem Strahle senkrecht stehen. Je nachdem die Schwingungen geradlinig, kreisförmig oder elliptisch sind, nennt man das Licht gradlinig, circular oder elliptisch polarisirtes Licht. Wir betrachten zunächst das geradlinig polarisirte Licht. Das polarisirke Licht unterscheidet sich von dem gewöhnlichen in der Reflexion, der Brechung, der Absorption, der doppelten Brechung und der Interferenz. Hieraus ergeben sich Mittel, das polarisirte Licht zu erkennen; die hierzu nöthigen Apparate nennt man Zerleger oder Analyseure.

Von einem hinten geschwärzten Spiegel oder einer größeren Anzahl von Glasplatten wird polarisirtes Licht nur dann vollständig reflectirt, wenn dieser Analyseur eine solche Lage hat, daß die Schw. parallel zur spiegelnden Fläche sind, wenn also die Polarisationsebene und die Reflexionsebene zusammen fallen, weil diese Schw. dann nicht zwischen die Mol. des Spiegels eindringen können; in diesem Falle erscheint also das Gesichtsfeld hell. Dreht man nun den Analyseur allmälig, dann sind die Schw. der Fläche nicht mehr parallel, enthalten aber noch eine parallele Componente, welche immer noch reflectirt wird. Da aber diese parallele Comp. bei weiterer Drehung immer mehr abnimmt, so muß auch die Intensität des reflectirten Lichtes abnehmen, bis sie endlich bei einer Drehung um 90° am kleinsten, das Gesichtsfeld im reflectirten Lichte am dunkelsten ist. Während dieser Drehung wächst dagegen die senkrechte Comp. der Schw. immer mehr, welche leicht auf die Aetheratome zwischen den Mol. stoßend einwirken und sich daher durch den Spiegel fortpflanzen kann; in einem geschwärzten Spiegel wird diese Comp. absorbirt, durch einen Glasstoß aber pflanzt sie sich fort. Folglich muß hinter dem Glasstoße bei der Drehung allmälig das Licht sichtbar werden, an Intensität immer mehr zunehmen und endlich bei der Drehung von 90° am stärksten werden. Wird nun der Analyseur noch weiter gedreht, so nimmt die Intensität des reflectirten Gesichtsfeldes wieder zu und die des gebrochenen ab, bis bei 180° die erstere wieder ein Maximum, die letztere ein Minimum erreicht hat; bei 270° ist dagegen das reflectirte Licht am schwächsten, das durchgelassene am stärksten u. s. w. — Ein anderer Analyseur ist eine dünne Turmalinplatte; der Turmalin hat die merkwürdige Eigenschaft, nur Schw. durchzulassen, die seiner Hauptachse parallel sind, und die zu derselben senkrechten Schw. zu absorbiren. Fallen daher zur Hauptachse parallele Schw. auf eine Turmalinplatte, durch welche man sieht, so erscheint das Gesichtsfeld hell; es bleibt auch hell, wenn man die Platte so dreht, daß die Achse immer den Schw. parallel ist; es nimmt aber an Helligkeit ab, wenn man die Achse zu einer wachsenden Neigung gegen die Schw. dreht, und erreicht bei 90° Drehung ein Minimum, wird dunkel. — Ein weiterer Analyseur ist der Doppelspath, der bekanntlich jeden Str. in zwei Str. zerlegt, von welchen die Schw. des einen auf dem Hauptschnitte senkrecht stehen und die des anderen in demselben liegen. Läßt man demnach polarisirtes Licht so auf einen Doppelspath fallen, daß die Polarisationsebene in den Hauptschnitt fällt, daß also die Schw. auf dem Hauptschnitte senkrecht stehen, so können diese unzerlegt durch den Krystall gehen, es entsteht nur ein Bild; ebenso entsteht nur ein Bild, wenn die Schw. des polarisirten Lichtes in den Hauptschnitt fallen; in allen anderen Fällen entstehen zwei Bilder, welche an Stärke ab-

und zunehmen, wenn man den Krystall aus der einen Lage in die andere dreht. Der beste Analyseur ist **Nicols Prisma** (1828) (Fig. 244). An einem Doppelspathrhomboeder werden die zwei parallelen Endflächen, die gegen die stumpfen Kanten unter 71° geneigt sind, so abgeschliffen, daß die Neigung noch 68° beträgt; dann wird der Krystall so durchschnitten, daß die Schnittfläche pn auf den zwei neuen Flächen mn und pq und auf dem Hauptschnitte senkrecht steht. Die beiden Schnittflächen werden gut polirt, dann mit Canadabalsam zusammengekittet und der gekittete Krystall in eine geschwärzte Messinghülse gefaßt. Bei dem Eintritte in diesen Krystall wird ein gewöhnlicher Str. ab in die bekannten zwei polarisirten Str. zerlegt; der ordentliche bd wird stärker gebrochen, fällt daher sehr schief auf die schwächer brechende Balsamschicht und wird deßhalb von derselben total reflectirt, auf die geschwärzte Hülse geworfen und dort absorbirt. Der außerordentliche Str. bc aber, d. i. der Str., dessen Schw. im Hauptschnitte liegen, geht wegen schwächerer Brechung durch. Sieht man daher durch einen Nicol auf polarisirtes Licht, so geht dieses nur ungeschwächt durch, wenn seine Polarisationsebene auf dem Hauptschnitte senkrecht steht; in jedem anderen Falle wird es geschwächt und beim Zusammenfallen der beiden Ebenen ganz aufgehoben. Im durchgelassenen polarisirten Lichte erscheint daher das Gesichtsfeld eines Nicol bei der Drehung bald hell, bald dunkel, während es im gewöhnlichen Lichte immer hell ist. Die Interferenz des polarisirten Lichtes wird später betrachtet.

Fig. 244.



376 **Die Polarisationsapparate** oder Einrichtungen, mittels deren man polarisirtes Lichte aus dem gewöhnlichen Licht erzeugen kann, sind mancherlei Art. Es kommt nämlich zwar in der Natur polarisirtes Licht vor; doch ist dasselbe immer mit gewöhnlichem Lichte gemischt; reines oder wenigstens vorherrschend polarisirtes Licht muß man daher künstlich darstellen. Dies kann geschehen 1. durch Reflexion, 2. durch einfache Brechung, 3. durch Absorption, 4. durch doppelte Brechung.

1. Polarisation durch Reflexion. Alles von spiegelnden Flächen, mit Ausnahme von Metallflächen, reflectirte Licht ist theilweise polarisirt. Wenn nämlich eine Schwingung schief gegen eine spiegelnde Fläche trifft, so wird die zu dieser Fläche parallele Componente nicht in die Fläche einzubringen vermögen, sondern zurückgeworfen werden; der zurückgeworfene, aus diesen Schwingungen bestehende Strahl wäre vollständig polarisirt, wenn nicht die andere Componente auch noch theilweise zurückgeworfen würde. Die Schwingungen der ersten Componente stehen auf der Einfallsebene senkrecht, die der zweiten müssen in diese Ebene fallen, weil sie sowohl auf dem Strahle wie auf der ersten senkrecht stehen. Wird von dieser anderen Componente nichts zurückgeworfen, sondern bringt dieselbe vollständig in den reflectirenden Körper, so ist der reflectirte Strahl vollständig polarisirt. Wann dieser Fall eintritt, das hängt von der Größe des Einfallswinkels ab; derjenige Einfallswinkel, den der vollständig polarisirte reflectirte Strahl, also auch dessen einfallender Strahl mit dem Einfallslothe macht, wird Polarisationswinkel genannt. Für denselben besteht folgendes Gesetz: Die Tangente des Polarisationswinkels ist gleich dem Brechungsexponenten des spiegelnden Körpers (Brewster 1815).

Beweis (Fresnel 1821). Der Beweis ruht auf dem Princip von der Erhaltung der Energie; die leb. Kft. der Wellenbewegung des einfallenden Lichtes muß nach diesem Princip gleich sein der Summe der Energieen der Wellenbewegungen des reflectirten Lichtes und der eindringenden gebrochenen Strahlen. In Fig. 243, wo dm die einfallende Welle, ge die reflectirte und gf die gebrochene darstellt, vertheilt sich die Wellenbewegung im Dreieck dmg, auf das gleiche Dreieck deg, das die reflectirte Wellenbewegung enthält, und auf das Dreieck dfg, das die gebrochene Wellenbewegung enthält; die 2 Inhalte dieser 3 Dreiecke verhalten sich wie dm . gm zu df . gf oder $\sin\alpha \cos\alpha : \sin\beta \cos\beta$. Bezeichnen wir nun die Dichte des Aethers im alten Medium mit δ, in dem neuen mit δ', so verhalten sich die wellenbewegten Aethermassen in den 2 ersten Dreiecken zu der Aethermasse des dritten Dreiecks wie $\delta \sin\alpha \cos\alpha : \delta' \sin\beta \cos\beta$. Wenn ferner die Geschw. der Wellenbewegung oder des Lichtes in der einfallenden Welle mit c, in der reflectirten mit x und in der gebrochenen mit y bezeichnet

wird, so sind die leb. Kfte. der drei Wellenbewegungen $c^2 \delta \sin\alpha \cos\alpha$, $x^2 \delta \sin\alpha \cos\alpha$, $y^2 \delta' \sin\beta \cos\beta$, und nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft besteht dann die Grundgleichung

$$c^2 \delta \sin\alpha \cos\alpha = x^2 \delta \sin\alpha \cos\alpha + y^2 \delta' \sin\beta \cos\beta$$

$$\text{oder } (c^2 - x^2)\, \delta \sin\alpha \cos\alpha = y^2 \delta' \sin\beta \cos\beta$$

Da nun nach der bekannten Fl. $c = \sqrt{(e/d)}$ die Geschw. des Lichtes in verschiedenen Aetherdichten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dichten verhalten, so ist $c : y = \sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta}$; da ferner nach der Lehre von der Brechung $c : y = \sin\alpha : \sin\beta$, so ergibt sich durch Verbindung der beiden Proportionen die neue $\sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta} = \sin\alpha / \sin\beta$ oder $\delta \sin^2\alpha = \delta' \sin^2\beta$. Dividiren wir die Grundgl. durch die letzte Gl., so nimmt jene die Gestalt an

$$(c^2 - x^2) \operatorname{cotg}\alpha = y^2 \operatorname{cotg}\beta.$$

Mittels dieser Gl. wollen wir untersuchen, unter welchen Umständen nur die zur Einfallsebene senkrechte Comp. jeder Schw. zurückgeworfen wird, wann also von der zweiten Comp. jeder Schw., welche in der Einfallsebene geschieht, kein Bestandtheil reflectirt wird, oder unter welchen Umständen die Intensität des in der Einfallsebene schwingenden reflectirten Lichtes = Null ist. Dies ist offenbar der Fall, wenn die Geschw. dieses Lichtes = Null ist; denn wo das Licht keine Geschw. hat, ist gar kein Licht vorhanden. Zum Zwecke dieser Untersuchung denken wir uns jede Wellenbewegung, die einfallende sowohl, wie die reflectirte und die gebrochene, jede in 2 Comp. zerlegt, von denen immer die Schw. der ersten in der Einfallsebene geschehen und die der zweiten auf derselben senkrecht stattfinden; die Geschw. der drei ersten Wellenbewegungen sind $c \cos\alpha$, $x \cos\alpha$ und $y \cos\beta$; und da diese Geschw. aus Schw. gleicher Richtung resultiren, so ist nach dem Parallelogramm der Kräfte $c \cos\alpha = x \cos\alpha + y \cos\beta$ oder $(c - x) \cos\alpha = y \cos\beta$. Wird die letzte Form der Grundgl. durch die letzte Gl. dividirt, so erhält jene die Gestalt

$$(c + x) \sin\beta = y \sin\alpha.$$

Eliminirt man nun y aus den 2 letzten Formen der Grundgl., so entsteht $(c - x) \sin\alpha \cos\alpha = (c + x) \sin\beta \cos\beta$, woraus man endlich den Werth für x aufsucht: $x = c (\sin\alpha \cos\alpha - \sin\beta \cos\beta) / (\sin\alpha \cos\alpha + \sin\beta \cos\beta)$

$$\text{oder } x = \frac{c \operatorname{tang}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tang}(\alpha + \beta)}, \text{ woraus } x \cos\alpha = \frac{c \operatorname{tang}(\alpha - \beta) \cos\alpha}{\operatorname{tang}(\alpha + \beta)}.$$

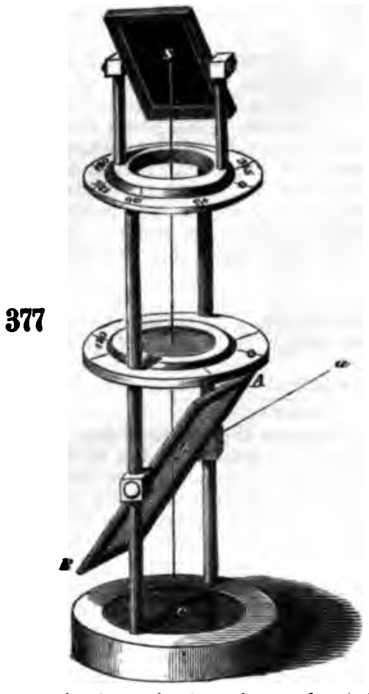
Dieser Ausdruck für die Geschw. des Lichtes in der reflectirten Welle, deren Schw. in der Einfallsebene stattfinden, wird = Null, wenn $\alpha + \beta = 90^\circ$ ist; demnach ist kein in der Einfallsebene schwingendes reflectirtes Licht mehr vorhanden, sondern nur auf derselben senkrecht schwingendes oder polarisirtes Licht, oder es ist der reflectirte Strahl vollständig polarisirt, wenn $\alpha_p + \beta_p = 90^\circ$, d. h. wenn der reflectirte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht. Nach dieser Form des Gesetzes, welche Brewster zuerst aufgefunden, ist *der Polarisationswinkel α_p derjenige Einfallswinkel, der durch den zugehörigen Brechungswinkel β_p zu 90° ergänzt wird, oder auch derjenige Einfallswinkel, bei welchem der reflectirte und der gebrochene Strahl auf einander senkrecht stehen.* Diese Form geht leicht in die obige gewöhnliche Form des Gesetzes über, wenn man in die Brechungsgl. $\sin\alpha_p = n \sin\beta_p$ den Werth $\beta_p = 90 - \alpha_p$ einsetzt; es ist dann $\sin\alpha_p = n \cos\alpha_p$ oder $\operatorname{tang}\alpha_p = n$. Obgleich hiernach der Polarisationswinkel für verschiedene Farben eine verschiedene Größe haben muß, so kann man doch des geringen Unterschiedes wegen auch weißes Licht für vollständig polarisirt ansehen.

Durch Glas wird demnach das zurückgeworfene Licht vollständig polarisirt, wenn $\operatorname{tang}\alpha_p = 3/2$, wenn also $\alpha_p = 56^\circ 19'$, d. h. wenn der Str. unter einem Winkel von $33^\circ 41'$ auf das Glas fällt. Hierauf beruhen verschiedene Polarisationsapparate; wir beschreiben den von Nörremberg (1830) (Fig. 245). AB ist der Polarisationsspiegel (Polariseur), der um $33^\circ 41'$ gegen die verticale Achse des Apparates geneigt ist; hierdurch wird ein unter $33^\circ 41'$ gegen den Polariseur geneigter Str. ab in diese Achse nach bc reflectirt und von dem ebenen, belegten Spiegel in der Bodenplatte des Apparates ebenso zurückgeworfen; er geht dann senkrecht aufwärts durch den Polarisationsspiegel nach bs; diese Einrichtung hat den Zweck, fremdes Licht abzuhalten. Nun trifft der Str. auf den Zerlegungsspiegel s, der oben drehbar aufgestellt ist. Da dieser Spiegel das polarisirte Licht polarisirt zurückwerfen soll, so muß er ebenfalls den Str. unter dem Polarisationswinkel aufnehmen, also ebenfalls eine Neigung von $33^\circ 41'$ gegen die Verticale haben. Hat der Zerleger die Stellung, daß sein Index am Nullpunkte der Kreistheilung steht, so ist er dem Polariseur parallel, die Reflexionsebene fällt mit der Polarisationsebene zusammen, man sieht bei dieser *Parallelstellung das Gesichtsfeld des Analyseurs hell.* Dreht man den Zerleger um 90°, so ist in dieser *Kreuzstellung das Gesichtsfeld dunkel*; bei der Drehung von 90 bis 180° hellt es sich allmälig wieder auf und erscheint bei 180° wieder ganz hell, da jetzt die Reflexionsebene und die Polarisationsebene wieder zusammenfallen; bei 270° ist das Gesichtsfeld abermals dunkel und bei 360° wieder hell. Am einfachsten erhält man polarisirtes Licht, indem man einen hinten geschwärzten Spiegel wagrecht auf den Tisch

legt und sich mit dem Nicol vor dem Auge so aufstellt, daß das ins Auge gelangende Licht etwa 35° mit dem Spiegel macht; beim Drehen des Nicols hat man bald ein dunkles, bald ein helles Gesichtsfeld, ersteres in der **Kreuzstellung**, letzteres in der **Parallelstellung**, wie man auch hier sagt; **Steegs Apparate** haben als Polariseur eine Glasplattensäule, einen Glasstoß, wodurch das polarisirte reflectirte Licht vermehrt wird, und als Analyseur einen Nicol.

Die Richtung der Polarisation bezeichnet man durch die Lage der Polarisationsebene; da die Polarisationsebene des zurückgeworfenen Lichtes in der Einfalls- oder Reflexionsebene liegt, so sagt man, der reflectirte Str. sei in der Reflexionsebene polarisirt. — Die Metalle haben wegen ihres großen B.-E. einen sehr kleinen Polarisationswinkel, erzeugen durch Reflexion so gut wie kein polarisirtes Licht; dagegen ist alles von Glas, Wasser, Luft, Weltkörpern reflectirte Licht theilweise polarisirt, was man durch das allmälige Ab- und Zunehmen der zwei Doppelspathbilder beim Drehen (Malus) oder durch das allmälige Aendern des Nicol-Bildes erkennen kann. Man macht hiervon Anwendung in der Astronomie zu der Untersuchung, ob ein Weltkörper mit eigenem oder mit fremdem Lichte leuchtet. Der Regenbogen, der blendende Glanz von Glas und Wasser, von Gemälden verschwindet beim Betrachten durch einen Nicol oder einen Turmalin. Der blaue Himmel ist in einer Ebene polarisirt, die durch die Sonne, das beobachtende Auge und den fixirten Himmelspunkt geht; hierauf beruht Wheatstones Polaruhr.

Fig. 245.



377 2. **Polarisation durch Brechung.** Wenn ein Lichtstrahl unter dem Polarisationswinkel auf Glas fällt, so ist der gebrochene Bestandtheil desselben schwach polarisirt; er wird es vollständiger, wenn er nicht durch eine einzige Glasplatte, sondern durch einen Glasstoß geht.

Denn nach dem Beweise in 376. ist, wenn $x \cos\alpha = 0$ ist, die Geschw. des in der Einfallsebene schwingenden gebrochenen Lichtes $y \cos\beta = c \cos\alpha$, also gleich der ganzen ebenso schwingenden Comp. des einfallenden Lichtes; der gebrochene Str. ist also senkrecht zur Einfallsebene polarisirt. Jedoch können die gebrochenen Comp. der auf das Glas fallenden Schw. noch mehr oder minder große Theile der zur Glasfläche parallelen Comp. enthalten und dadurch verschiedene, nicht parallele Richtungen haben; durch je mehr Platten aber der gebrochene Str. geht, desto mehr werden diese parallelen Theile durch Reflexion und Absorption beseitigt, desto mehr werden also die durchgehenden Schw. senkrecht auf dem gebrochenen Str. und auf den reflectirten stehen; folglich wird aus einem Glasstoße ein in der Einfallsebene schwingender, also ein senkrecht zu dieser Ebene polarisirter Str. treten. Ein Glasstoß ist deßhalb sowohl ein Polariseur wie ein Zerleger. Körper, die einen Schichtenbau haben, wie Perlmutter, Achat, liefern beim Durchgehen polarisirtes Licht.

378 3. **Polarisation durch Absorption.** Der Turmalin ist ein doppelt brechender Körper, der den ordentlichen Strahl absorbirt und nur den außerordentlichen durchläßt; das durch eine Turmalinplatte gegangene Licht ist daher polarisirt und zwar senkrecht zum Hauptschnitte. Ist die Oberfläche parallel zur Achse geschliffen, so sind die durchgehenden Schwingungen der Achse parallel.

Ein sehr brauchbarer Polarisationsapparat ist hiernach die **Turmalinzange**, eine Zange, federnd aus Draht oder Blech gebogen, die an ihren beiden einander gegenüberliegenden Enden Ringe zur Aufnahme der kreisförmig gefaßten Turmalinplatten trägt und so die Drehung derselben erlaubt. Die eine Platte ist der Polariseur, die andere der Analyseur. Sind die Achsen parallel, so ist das Gesichtsfeld hell, dagegen dunkel, wenn die Achsen einen rechten Winkel bilden. Je dicker der Polariseur ist, desto vollständiger ist das Licht polarisirt, aber desto schwächer ist es auch; die trübe grüne und braune Farbe der Turmalinplatten stellt sie hinter den Nicol zurück. Doch ist die Zange vortrefflich zur Beobachtung der Interferenzerscheinungen des polarisirten Lichtes. — Mittels einer Turmalinplatte kann man auf den Boden von tiefem Wasser sehen.

379 4. Polarisation durch doppelte Brechung. Die Schwingungen jedes ordentlichen Strahles stehen, wie in 373. gezeigt wurde, auf dem Hauptschnitte senkrecht, sind daher einander parallel, der ordentliche Strahl ist in den Hauptschnitt polarisirt; die Schwingungen des außerordentlichen Strahles dagegen liegen in dem Hauptschnitte, sind, da sie auf einer Ebene senkrecht stehen, einander parallel, der außerordentliche Strahl ist senkrecht zum Hauptschnitte polarisirt. Die beiden Strahlen sind senkrecht gegen einander polarisirt. Im Nicol wird nur ein Strahl durchgelassen; der Nicol ist daher ein vortrefflicher Polariseur, ebenso die Prismen von Foucault, Hartnack, Glan und Steeg.

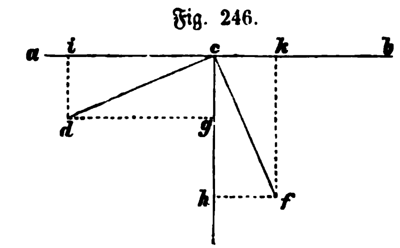
Schon Huyghens beobachtete, daß die vier Bilder, welche durch Aufeinandersetzen zweier Doppelspathe entstehen, bei der Drehung allmälig ihre Lichtstärke ändern und in gewissen Lagen bis auf zwei verschwinden. — Jeder doppelt brechende Krystall ist ein Polariseur und ein Analyseur; betrachtet man eine glänzende Fensterscheibe durch einen Doppelspath, so ändern sich bei der Drehung die Intensitäten der beiden Bilder. — Haidingers dichroskopische Lupe enthält einen Doppelspath zwischen zwei Glasprismen, gefaßt in ein Röhrengehäuse, das am einen Ende eine runde Oeffnung mit einer Sammellinse, am anderen eine quadratische hat, welche man durch die runde Oeffnung zweimal und zwar mit senkrecht gegen einander polarisirtem Lichte sieht. Die Lupe wird zur Darstellung der zwei Farben eines dichroitischen Körpers benutzt, zeigt jedoch auch die Doppelbrechung und ihre Polarisation und läßt an der Lichtänderung der zwei Bilder selbst Spuren polarisirten Lichtes erkennen; jedoch ist ihr Licht nicht ganz achromatisch, worin Senarmonts Prisma sie übertrifft. In der Mineralogie haben die Polarisationsapp. Anwendung zur Erkenntniß, ob ein Mineral einfach oder doppelt brechend ist: man schaltet das Mineral zwischen gekreuzten Analyseur und Polariseur ein, legt es z. B. auf die mittlere Glasscheibe (Fig. 245); bleibt das Gesichtsfeld bei der Drehung des Min. dunkel, so ist dieses einfach brechend: amorph oder tesseral; wechselt aber das Gesichtsfeld zwischen hell und dunkel, so ist das Mineral doppelt brechend. Rochons Mikrometer besteht aus zwei zusammengekitteten Bergkrystallprismen; die optische Achse des einen steht auf einer Seitenfläche, die des anderen auf der Grundfläche senkrecht. Fällt ein Str. auf die erste Fläche, so geht er ungebrochen bis zur Trennungsfläche; dort geht nun auch der ordentliche Str. ungebrochen weiter, während der außerordentliche etwas abgelenkt erscheint; den Ablenkungswinkel kann man nun sowohl aus den Winkeln des zweiten Prismas berechnen, als auch durch Beobachtung finden. Aus der Größe dieses Winkels und aus der Ablenkung der zwei Bilder eines Gegenstandes, welche man durch ein mit dem Mikrometer versehenes Fernrohr sieht, läßt sich die Größe des Gegenstandes, die Distanz zweier Punkte berechnen. — Manche organische Körper, wie Horn, Federspule, polarisiren das Licht wie optisch zweiachsige Körper. Auch das Auge scheint ein doppelt brechender Analyseur zu sein; denn nach Haidinger sieht man im polarisirten Lichte zwei blaßgelbe Büschel, gegen die manchmal noch zwei blauviolette in senkrechter Stellung erscheinen; man sieht am Besten durch einen Nicol nach einer hellen Wolke.

380 **Interferenz des polarisirten Lichtes, die chromatische Polarisation.** (Arago und Fresnel 1811—21). Zwei in derselben Richtung polarisirte Strahlen interferiren wie gewöhnliches Licht. Zwei rechtwinklig zu einander polarisirte Strahlen interferiren unter gewöhnlichen Umständen nicht. Zwei von einem polarisirten Strahle herrührende rechtwinkelig polarisirte Strahlen interferiren jedoch dann, wenn sie, z. B. durch einen Analyseur, auf dieselbe Polarisationsrichtung gebracht werden.

Zwei in derselben Richtung polarisirte Str. interferiren, weil sie dieselbe Schwingungsrichtung haben; sie verstärken sich nach dem ersten Gesetze der Interferenz, wenn ihr Phasenunterschied eine gerade Anzahl halber Wellenlängen beträgt, und schwächen sich, ja heben sich bei gleicher Amplitude auf, wenn sie in der Phase um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen verschieden sind. Zwei rechtwinkelig gegeneinander polarisirte Str. bringen in diesem Sinne keine Interferenz hervor, sie können sich nie aufheben, weil senkrecht gegen einen Punkt gerichtete Kräfte oder Bewegungen nach dem Parallelogramm der Kräfte eine reale Resultante haben. Arago und Fresnel wiesen nun durch mehrere Versuche nach, daß senkrecht zu einander polarisirte Str. sich wirklich unter gewöhnlichen Umständen nicht aufheben; da hingegen das natürliche Licht bei den bekannten Phasenunterschieden unter allen Umständen Interferenzen ergibt, so müssen die Schw. des natürlichen Lichtes nach allen Richtungen stattfinden, weil zwei Str. nur dann Schw. von gleicher Richtung enthalten; bei longitudinaler Schw. wäre dies unmöglich, weil Str. mit longitudinalen Schw. nur eine Schwingungsrichtung haben; also müssen die Lichtschw. transversal stattfinden; und zwar beim gewöhn-

lichem Lichte nach allen Richtungen, beim polarisirten aber nach einer Richtung, weil nur so die Nichtinterferenz senkrecht zu einander polarisirter Str. denkbar ist.

Fig. 246.



Daß senkrecht zu einander polarisirte Str. dennoch künstlich zur Interferenz gezwungen werden können, ist aus Fig. 246 ersichtlich; ab stelle z. B. den Hauptschnitt eines Nicols vor, auf welchen die zu einander senkrechten Schw. dc und fc treffen; nach der Lehre von der Doppelbrechung zerlegt sich dann dc in zwei Comp. ac und cg, parallel und senkrecht zum Hauptschnitte und ebenso cf in die 2 Comp. kc und ch von denselben Richtungen; da durch die Einrichtung des Nicol die zum Hauptschnitte senkr. Comp. des gewöhnlichen Str. beseitigt werden, was die anderen Analyseure durch Absorption oder Durchlassung bewirken, so bleiben nur die parallelen Comp. übrig, die bekanntlich interferiren. Hierauf beruhen folgende Erscheinungen:

381 1. **Färbung dünner Krystallblättchen** (Arago 1811). Dünne Blättchen doppelt brechender Krystalle, welche parallel zur optischen Achse oder zur Ebene der beiden Achsen geschliffen sind, erscheinen im gewöhnlichen Lichte farblos durchsichtig, im polarisirten Lichte aber lebhaft gefärbt, wenn sie mittels eines Analyseurs betrachtet werden. Die Farbe ist am lebhaftesten, wenn der Hauptschnitt des Blättchens mit der Polarisationsebene einen Winkel von 45° einschließt; bei der Drehung des Blättchens nimmt die Farbe an Intensität ab; bei 0° und 90° verschwindet sie im Hell oder Dunkel des Gesichtsfeldes. Die Farbe wird complementär, wenn man den Analyseur um 90° dreht; bei Anwendung eines Kalkspathprismas sieht man zwei Bilder mit complementären Farben, die sich an den Deckstellen zu Weiß ergänzen. Die Farben sind nach der Dicke der Blättchen verschieden; ein Gypsblättchen von 0,18mm Dicke ist in der Kreuzstellung roth von der dritten Ordnung Newtons, bei 0,16 grün, bei 0,14 blau, bei 0,13 purpur. Ein Blättchen, das aus nebeneinander liegenden Blättchen von verschiedener Dicke zusammengesetzt ist, erscheint demnach bunt (Kaleido-Polariskop); der Gypskeil zeigt die Newton'schen Lamellenfarben in parallelen Streifen.

Experimente. Am einfachsten nimmt man die Erscheinungen wahr mit dem schwarzen Spiegel als Polariseur und dem Nicol als Analyseur, indem man zwischen beide ein rautenförmiges Gypsblättchen vom Montmartre bringt, das zur bequemen Handhabung zwischen 2 Glasvierecke gefaßt ist. Ist der Nicol auf dunkles Gesichtsfeld gestellt, so sieht man eine rothe, grüne, blaue oder gelbe Raute, die in dem dunkeln Gesichtsfeld bei der richtigen Stellung eine überraschend helle Stärke zeigt; bei der Drehung des Nicol um 90° erreicht die complementäre Farbe ihren hellsten Glanz. Nimmt man statt des Nicol die Haidinger'sche Lupe, so sieht man zwei complementär gefärbte Felder, die bei der Drehung der Lupe um 90° sich in der Färbung umkehren. Betrachtet man das Blättchen durch ein Kalkspathprisma, so lassen sich die 2 Rauten leicht zu theilweiser Deckung bringen; an der Deckstelle tritt dann Weiß auf, wodurch die Farben als complementär erkennbar sind. Mit Nicol und Spiegel sieht man auch die prächtigen Polari-Kaleidoskope, die Steeg in mannigfacher Gestaltung liefert. — Für die folgenden Versuche benutzt man besser den Nörremberg. In der Parallelstellung des Analyseurs legt man (nach Abdrehung der Linse) ein Blättchen auf die Glasscheibe, deren Index man auf Null gestellt hat; man sieht dann z. B. eine rothe Raute, die man durch Drehen des Blättchens bis zur höchsten Stärke bringt. Wenn man nun die Glasscheibe dreht, so wird das Roth schwächer, verschwindet bei 45° und wächst dann wieder bis 90° u. s. w.; in der Kreuzstellung des Analyseurs ergibt sich das Gleiche für die grüne Raute. — Bringt man den Gypskeil rechtwinklig zur Polarisationsebene auf die Grundplatte des Analyseurs in der Kreuzstellung, so sieht man die zur Kante des Keiles parallelen Newton'schen Farbenstreifen; legt man ein Blättchen darauf, so erscheint ein Farbenstreifen schwarz und gibt hierdurch die Ordnung der Farbe an. — Werden zwei Rauten, von denen die eine in der Kreuzstellung roth und die andere complementär grün erscheint, gekreuzt auf einander gelegt, so sieht die gemeinsame Stelle weiß aus und ist von einem grün-rothen Stern umgeben; bei der Drehung des Analyseurs um 90° geht das Weiß in Schwarz über und die Sternfarben werden complementär.

Erklärung. Wenn die Schwingungsebene des vom Polariseur kommenden polarisirten Lichtes mit einer Schwingungsebene des Blättchens zusammenfällt, so kann das polarisirte Licht ungehindert durch das Blättchen gehen und trifft den Analyseur in derselben Ebene; in der Parallelstellung des Analyseurs erscheint daher das Gypsblättchen dem hellen Gesichtsfelde gleich, in der Kreuzstellung dunkel. Wenn aber die Schwingungsebene des polarisirten Str. nicht in eine Schwingungsebene des Blättchens fällt, so wird der Str. doppelt gebrochen, also in zwei Str. zerlegt, die nach der Lehre von der Doppelbrechung verschiedene Brechungsexp., also auch verschiedene Geschw. haben und daher mit einem Gangunterschiede aus dem Blättchen treten und auf dem Analyseur anlangen. Hier werden (Fig. 246) die Schw. der beiden Str., jede in zwei Comp. zerlegt, von denen je eine, z. B. beim Nicol die zum Hauptschnitte senkrechte, durch den Analyseur beseitigt wird, während die anderen beiden dieselbe Richtung haben, also je nach der Phasendifferenz sich verstärken oder schwächen, ja aufheben. Beträgt z. B. der Gangunterschied schließlich eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen des rothen Lichtes, so heben sich die Comp. für das rothe Licht auf; dann beträgt er aber eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen des violetten Lichtes, weßhalb sich die Comp. für das violette Licht verstärken. In diesem Falle werden auch die dem Roth nahen Farben theilweise aufgehoben und die dem Violett nahen theilweise verstärkt, wodurch Mischfarben wie die der Newton'schen Ringe entstehen, z. B. für den betrachteten Fall ein gemischtes Blau. Da (nach Fig. 246) die Aufhebung bei 45° am stärksten ist, indem die Comp. dann gleich sind, so ist auch hier die Färbung am stärksten. In der Kreuzstellung findet Verstärkung für die Comp. statt, die in der Parallelstellung aufgehoben werden; also entsteht die complementäre Farbe und zwar in besonderer Reinheit, durch Anwendung der Haidinger'schen Lupe oder eines Kalkspathprismas in gleichzeitiger Sichtbarkeit, die in letzterem Falle zur Herstellung von Weiß oder besser gesagt farbloser Helle eine überzeugende Anwendung findet. Bei der Auffindung der Newton'schen Ordnung einer Farbe muß das Blättchen natürlich so auf dem Gypskeil liegen, daß seine Farbe die gleiche Farbe des Keils aufhebt, was durch Drehen des Blättchens leicht zu erreichen ist. Daß die Farben wirklich die Newton'schen Lamellenfarben sind, läßt sich durch einen Apparat aus zwei Nicols und einem Zwischenblättchen erkennen, in dessen Analyseur man mit einem Spectroskop sieht; es erscheinen dann die Farbenbestandtheile im Spectrum, das jedoch außer den Fraunhofer'schen Linien noch dunkle Interferenzlinien (Talbot 1831) enthält, die Esselbach (1873) zur Berechnung der Schwz. der ultravioletten Linien L bis R benutzt hat. Es ist klar, daß der kleine Phasenunterschied nur bei sehr dünnen Schichten eintreten kann, und daß die Blättchen um so dünner sein müssen, je größer der Unterschied zwischen den B.-E. der beiden Doppelstr. ist; darum müssen Bergkrystallblättchen dicker sein als Glimmer- und Gypsblättchen; jedoch zeigen auch jene schon bei $^1/_2$mm Dicke die Erscheinungen nicht mehr; auch ist leicht ersichtlich, warum verschieden dicke Blättchen eines Stoffes verschiedene Farben liefern, indem mit der Dicke der Phasenunterschied zu- oder abnimmt. — Nach den zwei geschilderten Beobachtungsmethoden sieht man die Rauten in ihrer wahren Größe, weil die ins Auge gelangenden Str. parallel sind; mit der Turmalinzange oder zwei aneinander gesetzten Nicols sieht man dieselben nicht, weil die zum Auge gelangenden Str. convergent sind; mit solchen convergenten Str. verändern sich die Interferenz-Erscheinungen des polarisirten Lichtes überhaupt ganz und gar, jedoch müssen die Schichten, durch welche das Licht geht, eine größere Dicke haben.

2. Farbenringe in dicken Krystallplatten. Schaltet man in die Turmalinzange oder zwischen zwei Nicol'sche Prismen eine dickere Krystallplatte ein, oder legt man eine solche auf die Glasplatte in Nörrembergs Polarisationsapparat und befestigt noch eine Sammellinse über und unter derselben, so sieht man farbige Ringsysteme. In optisch einachsigen Krystallen, senkrecht zur Achse geschnitten, erscheinen bei gekreuzter Analyseurstellung farbige Ringsysteme mit einem schwarzen Kreuze, dessen Arme den Hauptschnitten des Analyseurs parallel sind, bei paralleler Analyseurstellung Kreissysteme in den complementären Farben mit einem hellen Kreuze. In optisch zweiachsigen Krystallen, die senkrecht zur Mittellinie geschnitten sind, d. h. zu der Linie, welche den Winkel der beiden optischen Achsen halbirt, erscheinen zwei Ringsysteme, deren Mittelpunkte den Achsen entsprechen und Achsenpunkte heißen, während die Ringe elliptisch und lemniskatisch verbunden sind. Wenn die Ebene der Achsen mit einem Hauptschnitte des Analyseurs zusammenfällt, so geht durch die Ringsysteme ein schwarzes Kreuz, dessen Arm durch die Achsenpunkte schmal ist, während der senkrechte große Breite hat. Dreht man die Platte, so geht das Kreuz in gekrümmte Schweife auseinander, die bei 45° in Hyperbeln übergehen, während

382

die Ringsysteme complementär werden; auch hier kehren sich Farbe und Licht um bei paralleler Analyseurstellung. Ist der Achsenwinkel zu groß, so ist nur ein Ringsystem sichtbar, das von einem dunkeln oder hellen Streifen durchschnitten wird. Um beide Ringsysteme sichtbar zu machen, und um die Erscheinung deutlicher und ungestörter wahrnehmen zu können, dient Nörrembergs mikroskopischer Polarisationsapparat, welcher über und unter der Platte die Strahlen concentrirende Linsensysteme enthält (nach Tschermaks Vorschlag Konoskop).

Erklärung. In ein Auge, das sich nahe an einer Platte, Nicol oder Turmalin, befindet, würde aus der nächsten Stelle ein senkrechter Str. gelangen, der auch senkrecht durch die zur optischen Achse senkrecht geschliffene einachsige Krystallplatte gegangen ist, wenn er nicht durch den gekreuzten Analyseur ausgelöscht würde; demnach muß diese nächste Mitte dunkel erscheinen. Rings um den gedachten Str. oder die optische Achse herum gelangen in das Auge convergente Str., von denen die gleich geneigten einen Kegelmantel bilden; unendlich viele solcher Kegelmäntel haben im Auge ihre Spitze. Vorher sind dieselben, natürlich in anderer Richtung, auch durch die Krystallplatte gegangen; die Str. wurden dabei meist zerlegt, in einen gewöhnlichen, zum Hauptschnitte der Platte senkrecht schwingenden und einen ungewöhnlichen parallel schwingenden Str. Da dieselben verschieden stark gebrochen werden, so wird jeder Kegelmantel, der in die Platte eintritt, in zwei zerlegt, die verschiedene Austrittsstellen haben. Indessen wird doch an jeder kreisförmigen Austrittsstelle eines gewöhnlichen Strahlenmantels auch ein ungewöhnlicher austreten, der von benachbarten Str. durch stärkere oder schwächere Brechung seine Richtung dorthin erhielt. Diese zusammen weiter zum Analyseur gehenden Strahlenmäntel haben nun wegen ihrer verschiedenen Neigung verschiedene Wege durch die Platte zurückgelegt und außerdem verschiedene B.-G.; demnach müssen sie einen Phasenunterschied enthalten, der bei ihrer Interferenz durch den Analyseur Farben erzeugt. Beträgt der Phasenunterschied schließlich eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen des rothen Lichtes, so werden die rothen Bestandtheile jedes Str. aufgehoben; für das violette Licht ist dann der Gangunterschied eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen, wodurch dasselbe verstärkt wird. So ergibt sich, daß Newton'sche Lamellenfarben in ringförmigen Figuren um den dunkeln Achsenpunkt entstehen. Da die Schw. auf den Str. senkrecht stehen, so werden die ordentlichen Comp. tangential und die außerordentlichen radial zum Kegelmantel austreten. Wo ein Kegelmantel den Hauptschnitt des Analyseurs schneidet, ist die ordentliche tangentiale Comp. senkrecht auf dem Hauptschnitt, geht also unzerlegt, ohne radiale Comp. weiter und wird im Analyseur aufgehoben; eine Vierteldrehung weiter ist die tang. Comp. = Null und die radiale am größten; da hier der Radius jener Tangente parallel ist, so gehen auch hier die Schw. unzerlegt weiter und werden vom Analyseur aufgehoben; folglich entstehen an jedem Kegelmantel an den 2 Schnittstellen mit dem Hauptschnitte und 90° weiter dunkle Stellen, die zusammen das schwarze Kreuz bilden. Demnach liegen die 2 Kreuzarme in den Hauptschnitten des Analyseurs, drehen sich mit diesem, aber nicht mit der Platte. — In ähnlicher Weise erklären sich die Erscheinungen in zweiachsigen Krystallplatten.

Die einachsigen Ringe sind um so größer, je dünner die Platte und je schwächer ihre Doppelbrechung ist; um vollständige Ringsysteme zu erhalten, müssen daher die Platten dick sein, etwa 1mm. Haben dieselben eine starke Doppelbrechung, so sind die Ringe mit der Turmalinzange und dem Nörremberg gut sichtbar, so im Kalkspath, dessen Ringe im Konoskop wegen gedrängter Feinheit fast verschwinden. Auch im Nickelsulfat, Brucit und Turmalin sieht man noch einigermaßen Kreuz und Ringe mit der Zange; jedoch in dünnen Platten schwach brechender Krystalle, wie Apatit, Sanidin, Beryll, sowie in einachsigem Glimmer zeigen sich mit der Zange nur einige Farbenbogen, während im Konoskop Kreuz und Ringe in prächtiger Entwickelung auftreten; auch mehr als 1mm dicke Quarzplatten zeigen hier die Erscheinung, jedoch verschwinden gegen die Mitte hin die dunkeln oder hellen Kreuzarme und machen einer Färbung Platz, welche Abweichung in die circulare Polarisation (384.) gehört. Andere Abweichungen beobachtet man am Apophyllit, da seine Ringe nur gelb und violett sind; Formänderungen der Ringe finden sich ebenfalls öfter, z. B. beim Beryll, Blutlaugensalz u. s. w.; auch im Quarz sind die inneren Ringe oft quadratisch. — Die Lemniscaten mit schwarzen Hyperbeln lassen Arragonit und Weißbleierz gut mit der Zange sehen; auch Salpeter ist dafür geeignet und läßt durch verschieden dicke Platten die Zunahme der Ringdurchmesser mit Abnahme der Plattendicke leicht erkennen; während eine dicke Salpeterplatte zahlreiche Ringe um die Achsenpunkte hat, sieht man in einer sehr dünnen Platte keinen Ring mehr, sondern nur die ovalen und eingebogenen Lemniscaten. Im Konoskop ergeben diese Platten schwache Erscheinungen; dagegen zeigt jener Apparat im Adular, zweiachsigen Glimmer, Talk, Baryt u. a. die herrlichsten Farben und Formen. Zucker, Kaliumbichromat u. A. lassen sich senkrecht zu einer Achse schleifen, so daß man mit der Zange die Ringe mit Balken wahrnehmen kann; im Konoskop sind diese Erscheinungen, z. B.

am Topas zu beobachten. — Auch hier finden sich seltsame Abweichungen. Im Titanit, Weißbleierz und Seignette-Salz (weinsaures Kalinatron) verschwinden z. B. in der 45°-Stellung die Ringe fast ganz und die schwarzen Hyperbeln erscheinen roth und blau gesäumt; man erklärt dies dadurch, daß die zwei Achsen für das rothe Licht einen größeren oder kleineren Winkel bilden als für das blaue Licht; denn im homogenen Licht sind die Ringe sichtbar, haben aber verschiedene Entf. der Achsenpunkte, woraus gefunden werden kann, daß z. B. im Seignettesalz der Achsenwinkel für die rothen Str. 76°, für die violetten aber nur 56° beträgt. Hierdurch springt die Bedeutung der Achsenwinkel und ihrer genauen Messung in die Augen, wofür Kirchhoff, V. v. Lang und Descloiseaux (1860—62) Achsenwinkelapparate construirt haben; einem ähnlichen Zwecke dient das Stauroskop (Kobell 1854), mittels dessen man die Auslöschungsrichtungen oder Schwingungsebenen der Krystalle bestimmt. — Einen besonders starken Einfluß der Wärme auf die Ringsysteme zeigt der Gyps; bei vorsichtiger Erwärmung rücken die Achsenpunkte der Ringe einander näher, fallen endlich ganz zusammen, so daß bei dieser Temp. der Gyps einachsig ist, und rücken dann bei mehr erhöhter Temp. wieder aus einander, jedoch in einer Richtung, die auf der des Näherns senkrecht steht. Betrachtet man den im Konoskop liegenden Krystall während seiner Abkühlung, so sieht man sämmtliche Phasen der Erscheinung in umgekehrter Reihenfolge. — Einen dauernden Einfluß übt die Wärme auf Glas; während gewöhnliches Glas wegen seiner einfachen Brechung im polarisirten Lichte keine Veränderung zeigt, sieht man in geglühten und schnell abgekühlten Glaswürfeln, in gepreßten Glasplatten und tönenden Gläsern mittels des Nörremberg oder mit schwarzem Spiegel und Nicol regelmäßige Farbenerscheinungen, die den Ringsystemen ähnlich sind; die Gläser sind also in jenen Zuständen doppeltbrechend geworden. — Gekreuzte Platten von Glimmer, Arragonit, Topas, Titanit haben im Konoskop 4 Achsenbilder, zwischen denen in der Mitte das dunkle Feld in 4 farbige Hyperbelsysteme übergeht; dieselbe 4fache Hyperbole sieht man auch in Gyps- oder Quarzplatten, die 4 bis 8mm dick parallel zur Achse geschliffen sind. — In der mineralogischen Technik lassen sich mittels dieser Erscheinungen einachsige von zweiachsigen Krystallen unterscheiden, z. B. einachsiger von zweiachsigem Glimmer; auch kann aus der Größe der Ringe im Verhältnisse zur Plattendicke ein Urtheil über die Stärke der Doppelbrechung gebildet werden, aus dem Abstande der Achsenpunkte eine Schätzung des Achsenwinkels u. s. w.; da man kann sogar positive von negativen Krystallen unterscheiden, wozu eine sehr dünne Glimmerplatte (Viertelundulationsplatte 383.) benutzt wird, auf welcher durch einen aufgezeichneten schwarzen Pfeil die Richtung der Achsenebene markirt ist. Schiebt man dieselbe über Kreuz und Ringe im Konoskop mit dem Pfeile in der Diagonalstellung, so wird das Kreuz in 2 Hyperbeln mit schwarzen Scheitelpunkten verwandelt, liegen diese in der Pfeilrichtung, so ist der Krystall negativ, andernfalls positiv. Innerhalb der Hyperbeln sind die Ringe hinausgeschoben, daher können auch die hinausgeschobenen Ring-Quadranten benutzt werden. Bei den zweiachsigen Krystallen nimmt man die Mittellinien des spitzen und des stumpfen Achsenwinkels als gewöhnlichen und ungewöhnlichen Str. und bezeichnet auch hier die Krystalle als pos. und neg.; zur Erkennung benutzt man hier die Lemniscatenringe in der Normalstellung: der Krystall ist neg., wenn der Pfeil durch die Quadranten der hinausgeschobenen Ringe geht, andernfalls pos. — Die Kalkspathringe wurden zuerst von Brewster, Wollaston, Biot und Seebeck (1813—16) beobachtet; ihre Theorie gab Airy 1830. Die Hyperbole parallel zur Achse geschnittener Platten wurde von Johann Müller (1835) entdeckt und erklärt. Auch die zweiachsigen Figuren beobachtete Brewster (1814), Herschel gab ihre theoretische Erklärung (1820) und Senarmont ihre vollständige Theorie. Die Erscheinungen in gekühltem Glase beobachtete ebenfalls zuerst Brewster (1817).

3. Die circulare Polarisation (Fresnel 1817). Wenn zwei senkrecht zu einander polarisirte Strahlen von gleicher Schwingungsdauer in derselben Richtung fortschreiten und eine Phasendifferenz von 1/4 Wellenlänge haben, so erzeugen sie bei gleicher Amplitude kreisförmig polarisirtes Licht und bei verschiedener Amplitude elliptisch polarisirtes Licht, d. i. solches Licht, dessen Aetherschwingungen auf dem Strahle senkrechte Kreise oder Ellipsen sind. 383

Zwei senkrecht zu einander polarisirte Str., deren Phasendifferenz Null oder eine beliebige Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, erzeugen wieder geradlinige Schw., weil schwingende Aethertheilchen nach jeder halben Schwingungszeit in der ursprünglichen Lage mit dem Max. ihrer Geschw. anlangen und daher wegen ihrer senkrechten Richtung eine Amplitude gleich der Diagonale ihres Parallelogramms der Kräfte erzeugen. Sind sie dagegen um 1/4 Wellenlänge verschieden, so ist das eine Theilchen am Ende seiner Amplitude in Ruhe und wird senkrecht zu seiner Amplitude von dem anderen Theilchen im Max. von dessen Geschw. getroffen; es weicht daher in diesem Augenblicke senkrecht von seiner bisherigen Richtung mit großer Geschw. ab; da diese jedoch nach dem Gesetze der schwingenden Be-

wegung fortwährend kleiner wird, während die Geschw. in der früheren Richtung, die eben = 0 war, nach und nach zunimmt, so muß das Theilchen von der eingeschlagenen senkrechten Richtung anfänglich wenig, dann immer mehr abweichen und zu der früheren Richtung immer mehr zurückkehren, bis es nach $1/4$ Schwingungszeit von der senkrechten Richtung ganz befreit ist und die parallele wieder völlig angenommen hat. Es hat offenbar, wenn die Maximalgeschw., also auch die Amplituden gleich waren, in $1/4$ Schwingungszeit $1/4$ Kreis beschrieben, und wenn sie ungleich waren, $1/4$ Ellipse; ebenso muß es in der ganzen Schwingungszeit einen Kreis oder eine Ellipse zurücklegen. In ähnlicher Weise ergibt sich, daß eine elliptische Schw. entsteht, wenn der Phasenunterschied zwischen 0 und $1/4$, oder zwischen $1/4$ und $1/2$ Wellenlänge u. s. w. liegt. — Wenn man die gleichzeitigen Lagen aller Aethertheilchen des elliptischen oder circularen Lichtes verbindet, so entsteht nicht wie für das geradlinig polarisirte Licht eine ebene Welle von der gewöhnlichen Wellenform, sondern eine Schraubenlinie, weil jedes in der Fortpflanzungsrichtung voran liegende Aethertheilchen in seiner Kreisbahn gegen das folgende etwas zurück ist; die Schraubenwelle ist vollendet, wenn das erste Aethertheilchen seine Kreisbahn durchlaufen hat, während das letzte in der Fortpflanzungsrichtung mit ihm liegende Theilchen die seinige erst beginnt.

Fresnel stellte zuerst circular polarisirtes Licht her mit seinem Parallelepiped; er beobachtete nämlich, daß die totale Reflexion keine Spur von polarisirtem Licht erzeugt, ja im Gegentheile geradlinig polarisirtes Licht scheinbar in gewöhnliches Licht verwandelt, dasselbe depolarisirt. Bei näherer Untersuchung stellte es sich heraus, daß diese sogenannte *Depolarisation* nur eine Verwandlung in circulare Polarisation ist. Denn das circular polarisirte Licht bietet nach keiner Seite hin Verschiedenheiten der Schw. dar, wie gewöhnliches Licht auch; es verhält sich demnach gegen jeden Analyseur wie gewöhnliches Licht, das Gesichtsfeld bleibt immer gleich hell. *Fresnels Parallelepiped* hat einen stumpfen Winkel von 125°, so daß Str., die senkrecht zu einer Grundfläche eintreten, zweimal total reflectirt werden und durch die andere Grundfläche wieder senkrecht austreten. Fresnel zeigte nun, daß bei der totalen Reflexion ein Str. in 2 senkrecht zu einander polarisirte Str. zerlegt wird, die mit einem Gangunterschied von $1/8$ Undulation weitergehen; durch zweimalige totale Reflexion beträgt dieser Unterschied $1/4$ Undulation, wodurch circular polarisirtes Licht entsteht. Wenn nun auch dieses Licht im Analyseur vom gewöhnlichen Lichte keinen Unterschied zeigt, so ist es doch offenbar innerlich von demselben verschieden, muß also auch eine äußere Unterscheidung zulassen. Eine solche besteht darin, daß es durch Zufügung von $1/4$ Undulation zu geradlinig polarisirtem Lichte wird, indem dann der Gangunterschied $1/2$ Wellenlänge beträgt; Fresnel zeigte dies, indem er 2 Parallelepipede auf einander setzte: beim Drehen des Analyseurs wurde das Gesichtsfeld zweimal hell und dunkel. — Wir können dies einfacher durch die *Viertelundulationsplatte* bewirken, die auch ein zweites Mittel zur Darstellung des circular polarisirten Lichtes gewährt. Der Glimmer läßt sich nämlich so dünn spalten (etwa $1/30^{mm}$), daß der Gangunterschied der 2 aus ihm hervortretenden Str. $1/4\,l$ beträgt; auf solchen Viertelundulationsplatten, von denen wir schon in 382. eine Verwendung angegeben haben, ist die Richtung der Achsenebene durch einen Pfeil bezeichnet; praktisch erkennt man dieselben daran, daß sie auf dem wagrechten Spiegel des Nörremberg bei der Drehung des Analyseurs ein purpurrothes und das complementäre grüngelbe Gesichtsfeld zeigen. Legt man sie dagegen auf die Glasscheibe, so bleibt das Gesichtsfeld bei der ganzen Drehung des Analyseurs hell, abgesehen von einem farbigen Anhauch, der dadurch entsteht, daß $1/4\,l$ für die verschiedenen Farben verschieden ist. Wird nun auf die Viertelplatte eine zweite gelegt mit parallelen Pfeilen, so ist die Gleichmäßigkeit des Gesichtsfeldes bei der Analyseurdrehung stark gestört, was die Entstehung geradlinig polarisirten Lichtes andeutet. — *Elliptisch polarisirtes* Licht ist zu erzeugen mit *Babinets Compensator*; derselbe besteht aus zwei an Form und Größe ganz gleichen, dünnen Bergkrystallkeilen, deren Querschnitte lange und dünne Paralleltrapeze, an einer Seite rechtwinklig, sind; mit ihren schrägen Seiten auf einander gelegt bilden sie eine rechteckige Platte; jedoch kann die eine Hälfte gegen die andere mittels einer Schraube beliebig verschoben werden. Die brechende Kante des einen Prismas ist senkrecht zu seiner Achse, die des anderen parallel; daher werden die zwei senkrecht zu einander polarisirten Str., die aus dem einen Keil in den anderen übergehen, hinsichtlich ihres Phasenunterschiedes compensirt, wenn sie an einer Stelle durchgehen, wo beide Keile gleiche Dicken haben; an allen anderen Stellen treten jedoch die Str. mit beliebigen Phasenunterschieden aus und erzeugen so elliptisch polarisirtes Licht. Dasselbe ist daran zu erkennen, daß es wie das geradlinige zwischen Analyseur und Polariseur ein Max. und ein Min. der Intensität erzeugt, jedoch im letzteren nie bis zur Dunkelheit herabgeht, sich derselben aber um so mehr nähert, je gestreckter die Ellipsen sind, je näher die Phasendifferenz an Null oder $1/2\,l$ kommt. In dieser Eigenschaft des Hell- und Schwachwerdens stimmt das elliptische Licht mit dem theilweise polarisirten überein; es unterscheidet sich von diesem dadurch, daß es wie das circulare Licht durch eine Viertelundulationsplatte in geradlinig polarisirtes verwandelt werden kann. Das elliptische

Licht spielt auch beim Metallglanz eine Rolle; Malus hatte beobachtet, daß die von Metallen reflectirten Str. kein polarisirtes Licht enthalten; Brewster (1816) zeigte jedoch, daß eine theilweise, wechselnde Polarisation unverkennbar sei; Neumann (1832) erklärte dieselbe als elliptische Polarisation, welche durch 2 senkrecht und parallel zur Einfallsebene polarif. Str. entstehe, in welche durch die metallische Reflexion das Licht mit einer Phasendifferenz zerlegt werde. Quincke wies aber nach (1867), daß auch das durch die äußerste Oberflächenschicht eingedrungene und von innen reflectirte Licht hierbei mitwirke. Eilhard Wiedemann führte (1872) die Analogie der Körper mit Oberflächenfarben durch, indem diese, jedoch nur für gewisse Farben, elliptische Polarisation bewirken. Endlich hatte Airy schon 1833 gefunden, daß auch der Diamant durch Refl. solches Licht elliptisch polarisire, dessen Einfallswinkel dem Polarisationswinkel nahe komme, was Jamin (1848) auf zahlreiche andere Körper ausdehnte.

4. Die Drehung der Polarisationsebene. Wenn zwei circular polarisirte Strahlen von gleicher Amplitude, aber entgegengesetzter Drehrichtung zusammenfallen, so vereinigen sie sich zu einem geradlinig polarisirten Strahl, dessen Schwingungsrichtung auf der Verbindungslinie der gleichzeitigen Lagen eines Theilchens senkrecht steht, wodurch die Polarisationsebene jener Verbindungsstrecke parallel wird. Umgekehrt ein geradlinig polarisirter Strahl kann in zwei circular polarisirte Strahlen zerlegt werden; werden dieselben durch einen Analyseur ohne Phasenunterschied wieder vereinigt, so fällt die Polarisationsebene des vereinigten Strahles mit der des ursprünglichen zusammen; haben sie jedoch vor der Vereinigung einen Phasenunterschied angenommen, so erhält die neue Polarisationsebene eine andere Lage als die ursprüngliche, die Polarisationsebene hat eine Drehung erfahren. 384

Wenn ein Aethertheilchen, das am Anfangspunkte irgend eines Durchmessers eines Kreises liegt, von zwei Str. getroffen wird, die aus Schw. von dieser Kreisform bestehen, jedoch der Rotation nach entgegengesetzt sind, so wäre es durch die eine Rotation allein am Endpunkte einer auf dem Dm. senkrechten Sehne und durch die andere Rotation allein am anderen Endpunkte derselben Sehne; durch beide Rotationen zusammen gelangt es daher in den Mittelpunkt der Sehne, d. h. auf den Dm.; und da dies für alle Stellen gilt, so folgt als Resultat der beiden Rotationen die Bewegung im Dm., eine geradlinige Polarisation, womit der erste Satz klar ist, für den übrigens Fresnel und seine Nachfolger scharfe Beweise geliefert haben, wobei besonders Airy (1831) wegen seiner vollendeten mathematischen Ableitung aller Einzelheiten zu nennen ist. Die Umkehrung des Satzes darf wohl auch hiermit als hinreichend erhellt angesehen werden. Bei gleichbleibender Phasendifferenz wäre das Theilchen immer in den Endpunkten der senkrechten Sehnen, die Schw. würde im Dm. stattfinden. Ist jedoch vor der Vereinigung eine Phasendifferenz eingetreten, indem die Geschw. in der einen Rotation gegen die Geschw. in der anderen verändert worden ist, so wäre das Theilchen durch die eine Rotation schon am Endpunkte der senkrechten Sehne angelangt, während es durch die andere Rotation noch nicht am anderen Endpunkte derselben angelangt wäre, die Sehnen, welche die gleichzeitigen Lagen des Theilchens verbinden, erhalten somit eine andere Richtung; hierdurch wird auch die Richtung des auf den Sehnen senkrechten Dm. verändert, d. i. die Schwingungsrichtung und damit auch die hierauf senkrecht stehende Polarisationsebene; die Polarisationsebene wird also gedreht. Ist die rechts drehende (d. i. im Sinne der Uhrzeiger stattfindende) Rotation überwiegend, so wird auch die Polarisationsebene nach rechts gedreht, im entgegengesetzten Falle nach links.

Die erste hierher gehörige Beobachtung wurde von Arago (1811) angestellt; derselbe fand, daß eine senkrecht zur Achse geschliffene Quarzplatte zwischen Polariseur und Analyseur niemals farblos hell oder dunkel wie Glas erscheint, was man aus ihrer einfachen Brechung in der Achsenrichtung erwarten sollte, sondern farbig, und daß die Farbe sich bei der Drehung des Analyseurs ändert. Biot beobachtete sodann (1819) die Drehung der Polarisationsebene und nahm Messungen derselben vor. Fresnel gab die Erklärung durch die circulare Polarisation. Er stellte die Hypothese auf, daß der Bergkrystall einen eintretenden geradlinig polarisirten Str. in zwei circular polarisirte Str. von gleicher Amplitude, aber entgegengesetzter Drehrichtung zerlege; jedoch erhob er diese Hypothese durch ein hoch bedentsames Experiment zum Range einer unumstößlichen Thatsache. Daß diese Str. bei ihrem Austritte aus der Quarzplatte einen Phasenunterschied enthalten, ist bei der häufigen Wiederkehr dieser Erscheinung in den doppeltbrechenden einachsigen und zweiachsigen Krystallen wohl kaum anzuzweifeln; hierdurch ist die Drehung der Polarisationsebene bei der Vereinigung durch den Analyseur begreiflich. Auch liegt der Gedanke nahe, daß die Drehung der Polarisationsebene mit der Dicke der Platte wächst, weil das Voranseilen der einen Rotation um so stärker wird, auf je längerem Wege sie stattfindet; nähere Forschung ergibt sogar die Proportionalität zu der Dicke. Endlich ist eine Verschiedenheit der Drehung für verschiedene

Farben unverkennbar; denn der Phasenunterschied zweier Str. hat immer seinen Grund in der verschiedenen Geschw. derselben, in den verschiedenen Brechungsexponenten. Da nun die W.-L. der Farben verschieden sind, so haben dieselben auf ihrem Schraubengange durch den Krystall eine verschiedene Geschw., Violett die größte und Roth die kleinste; wo also eine Rotation der anderen voraus eilt, muß auch das Violett am meisten vorauseilen: die Drehung der Polarisationsebene ist für Roth am kleinsten, für Violett am größten. Biot stellte (1819) sogar das Gesetz auf, daß sie dem Quadrat der Wellenlänge umgekehrt proportional sei, was jedoch nach Broch und Stefan (1860,70) nur annähernd gilt. Hätte man für alle sieben Spectralfarben homogene Gläser, so könnte man mit dem Nörremberg die Größe der Drehung ablesen; für Roth und Blau lassen sich die Versuche leicht anstellen: man bringt ein homogenes rothes Glas in den Apparat und stellt den Analyseur auf hell; legt man nun eine Quarzplatte darauf, so muß man den Analyseur 19° weiter drehen, um das helle Gesichtsfeld zu erhalten; ebenso 19° über die Kreuzstellung hinaus, um Dunkel herzustellen; die Polarisationsebene von Roth ist also um 19° gedreht.

Der Bergkrystall dreht die Polarisationsebene des Lichtes und zwar für höhere Farben um einen wachsenden Winkel, Roth 19°, Gelb 24°, Blau 32°, Violett 40°. Wo demnach bei Anwendung weißen Lichtes für das Roth schon dunkel hergestellt ist, sind die übrigen Farben noch mit steigender Intensität vorhanden, es entsteht ein gemischtes Blau; die Farben sind folglich nahezu die complementären Mischfarben der Spectralfarben, folgen bei der Drehung ungefähr nach Newtons Reihe. Wenn bei paralleler Analyseurstellung Gelb verlöscht ist, so sind auch Orange und Grün stark geschwächt; die übrigen Spectralfarben vereinigen sich zu einem schönen Purpur (empfindliche oder Uebergangsfarbe); dasselbe geht durch Rothgelb in Gelb über, wenn man den Analyseur dreht, wonach bei weiterer Drehung Grün und Blau erscheinen, das bei 180° Drehung wieder in Purpur übergeht. Hierbei ist die gewöhnliche Rechtsdrehung (im Sinne der Uhrzeiger) gemeint; man nennt alle Krystalle, für welche bei der Rechtsdrehung Blau in Purpur übergeht, rechtsdrehend, weil auch die Polarisationsebene nach rechts gedreht wird; dagegen heißen die Krystalle linksdrehend, bei welchen das Blau durch Linksdrehen des Analyseurs in Purpur übergeht, weil in solchen auch die Polarisationsebene nach links gedreht wird; es gibt rechts- und linksdrehende Bergkrystalle.

Den natürlichen Bergkrystallen sieht man es schon an der Gestalt an, ob sie rechts- oder linksdrehend sind; befinden sich bei einem Krystall, den man aufrecht vor sich hin die Spitze nach oben hält, die Abstumpfungen zwischen den Pyramiden- und Säulenkanten rechts oben an den Seitenflächen, so ist er rechtsdrehend; sind sie links oben, so ist er linksdrehend. Man sieht hieraus, daß die Drehung der Polarisationsebene durch die Art der Lagerung der Mol. bedingt ist; so mag auch die circulare Polarisation durch die Zusammensetzung aus Pyramidenschalen bewirkt werden, aus denen der Bergkrystall nach der wagrechten Streifung seiner Seitenflächen gebildet scheint. Auch der Zinnober, der die Polarisationsebene 15mal stärker als der Quarz dreht, tritt in rechts- und linksdrehenden Stücken auf (Descloiseaux 1857). Jedoch findet sich die Erscheinung nicht blos an hexagonalen Krystallen, sondern auch in anderen Systemen. Natriumchlorat und ähnliche reguläre Salze drehen die Polarisationsebene von polarisirtem Lichte jeder Richtung und zwar nur rechts (Marbach 1854); das tetragonale Strychninsulfat dreht nach links (Descloiseaux 1859); dieser Stoff bietet auch noch die Ausnahme dar, daß er im festen und im gelösten Zustande Drehungsvermögen besitzt, während Zucker und andere Stoffe wohl im gelösten, nicht aber im festen Zustande drehend wirken, und das Siliciumdioxyd wohl im krystallisirten Zustande als Bergkrystall, nicht aber im amorphen und in Lösungen seiner Salze die Eigenschaft besitzt.

Die Anstellung der Versuche mit dem Bergkrystall geschicht am einfachsten mit zwei Nicols; indeß gelingen sie auch mit dem Nörremberg; im Konoskop fallen sie etwas anders aus. Legt man irgend eine Platte von 1mm bis 1cm Dicke zwischen die zwei Nicol und schaut nach dem hellen Himmel, so sieht man das Gesichtsfeld farbig. Dreht man nun den Analyseur, so ändert sich die Farbe, und man sieht nach und nach sieben Farben, die jedoch nur im allgemeinen den sieben Spectralfarben ähnlich sind und aus welchen nur der Uebergangspurpur durch Glanz und Sättigung hervorragt. Gleiches beobachtet man im Nörremberg. Um bei gekreuzter Analyseurstellung in sieben verschiedenen Platten die sieben Farben zu erhalten, müssen die Platten an Dicke von 6—12mm zunehmen; mit so dicken Platten sieht man auch im Konoskop das Mittelfeld farbig und sieht dasselbe bei der Analyseurdrehung bis zu 180° nach und nach die sieben Farben annehmen und zur anfänglichen Farbe zurück-

kehren; jedoch ist es auch von den Ringen und Kreuzresten umgeben. Mit dünnen Platten sind Kreuz und Ringe ebenfalls vorhanden; das Mittelfeld ist jedoch nicht gleichmäßig gefärbt und ändert sich ungleichmäßig sammt Kreuz und Ringen während der Analyseurdrehung. In einer optisch rechts drehenden Platte von 1—2mm Dicke sieht man in der Analyseurkreuzstellung runde Ringe mit den Balkenresten; im hellen Mittelfelde sind die Endpunkte derselben durch ein hyperbolisch begrenztes blaßblaues Kreuz verbunden; dreht man nun den Analyseur rechts, so nähern sich die Ringe der Vierecksform und rücken quadrantweise nach außen, während das blaue Kreuz stärker und dunkler wird. Bald wird bei weiterer Drehung das an Größe wachsende blaue Kreuz in der Mitte Purpur, während vier blaue Endflecken übrig bleiben, die immer weiter hinausrücken und bald an Stelle eines fortgerückten Ringes einen neuen bilden, während das rothe Mittelfeld durch Braun in fahles Gelb übergegangen ist und das schwarze Achsenkreuz durch ein helles ersetzt war; wenn der neue Ring sich vollständig ausgebildet hat, ist das fahle Mittelgelb wieder in schwaches Blau übergegangen und das schwarze Kreuz wieder hergestellt. Mit einer linksdrehenden Platte erhält man dieselbe Folge von Erscheinungen, wenn man den Analyseur nach links dreht; bei der gewöhnlichen Drehung nach rechts treten dagegen die Erscheinungen in umgekehrter Folge auf. Eine Doppelplatte von 3,75mm Dicke zeigt bei der parallelen Analyseurstellung in beiden Theilen die Purpurfarbe ganz gleichmäßig; da bei der rechtsdrehenden das Purpur in Roth und bei der linksdrehenden in Blau übergeht, wenn man den Analyseur in gewöhnlicher Art dreht, so verändert sich bei der geringsten Drehung die gleichmäßige Purpurfärbung in Roth der rechtsdrehenden und Blau der linksdrehenden Hälfte, welche Farben sich scharf unterscheiden; hierdurch wird es klar, warum jenes Purpur empfindliche oder Uebergangsfarbe (teinte de passage) genannt wird (Soleil 1845). Interessant ist, daß man künstlich circular polarisirende Körper aus einachsigen zusammensetzen kann, z. B. aus halbgekreuzten Glimmer- und Gypsblättchen, aus einer größeren Anzahl Bertin'scher Gelatineblättchen, von denen Steeg fertige Combinationen liefert. Eine der schönsten Erscheinnngen der circularen Polarisation, die Quarzspirale, zeigt eine Platte, die aus zwei gekreuzten, gleich dicken rechts und linksdrehenden Quarzplatten znsammengesetzt ist.

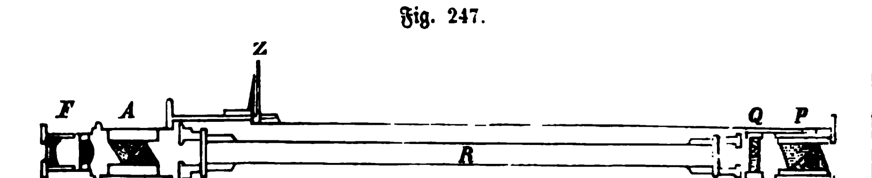
5. Die Saccharimetrie (Biot 1819), **das Polaristrobometer** (Wild 1865). **385** Zahlreiche Flüssigkeiten und Lösungen drehen die Polarisationsebene des polarisirten Lichtes, das durch eine dicke Schicht, eine lange Säule derselben gegangen ist. Bei Lösungen von Rohrzucker ist die Drehung dem Zuckergehalte proportional, weßhalb aus der Größe der Drehung der Zuckergehalt erschlossen werden kann. Jenes Gesetz von Biot ist daher die Grundlage der Saccharimetrie, der Messung des Zuckergehaltes einer Zuckerlösung. Die größte Genauigkeit ist mit Wilds Polaristrobometer erreichbar, da mit demselben die Drehung der Polarisationsebene auf 0,03° genau gemessen werden kann, was bei der Zuckerbestimmung einer Genauigkeit von 0,021 Procent gleichkommt; jedoch soll die Genauigkeit der neuesten Halbschatten-Saccharimeter noch weiter gehen.

Da die Drehung bei den Flüssigkeiten und Lösungen viel schwächer ist als durch Quarz, jedoch mit der Dicke der Schicht wächst, so ist zur deutlichen Wahrnehmung eine flüssige Säule von 1—3dm Länge gebräuchlich. Schaltet man z. B. zwischen zwei gekreuzte Nicol eine 1dm lange mit Rohrzuckerlösung gefüllte Röhre ein, die an beiden Enden durch Glasscheiben geschlossen ist, so muß man den Analyseur mehr als 60° drehen, um das dunkle Gesichtsfeld wieder zu erhalten, vorausgesetzt, daß 1ccm Wasser 1g Zucker enthält. Rohrzuckerlösung dreht demnach die Polarisationsebene rechts. Ebenso drehen rechts (+) Lösungen von Milchzucker, Traubenzucker oder Dextrose, Dextrin oder Stärkegummi und Weinsäure, dann Citronenöl und viele ätherische Oele. Links drehend (—) sind Lösungen von Fruchtzucker oder Levulose, Gummiarabicum, Leimarten, Eiweißstoffen, Chinin, Morphin, Strychnin, Nicotin, dann Kirschlorbeerwasser. Das Terpentinöl ist je nach seiner Abstammung bald links, bald rechts drehend und besitzt die active Eigenschaft auch im Dampfzustande. Traubensäure ist an sich nicht activ, kann aber gespalten werden in rechtsdrehende Traubensäure oder Weinsäure und links drehende Traubensäure; Salze dieser beiden Säuren zeigen wie die Bergkrystalle rechts oder links Hemiedrie, was darauf hindeutet, daß hier die circulare Polarisation durch die Krystallform der Mol. bedingt wird (Pasteur 1850). Biot schlug schon als Maß der Drehung den Winkel vor, um welchen die Polarisationsebene durch eine Säule von 1dm Länge gedreht wird, welche in 1ccm Lösungsmittel oder Volumen 1g des drehenden Stoffes enthält; man nennt diese Größe das specifische oder molekulare Drehungsvermögen. Nach Wild (1865) beträgt dasselbe für Rohrzuckerlösung $[\alpha]_D = 66,417°$ bei dem homogenen Natriumlichte, was durch deu Index D an der Bezeichnung $[\alpha]$ angedeutet sein soll; das Drehungsvermögen für Quarz ist 32, 627 mal so groß. Nach Soret und Sa-

rafin ist für die höchsten Cadmium-Linien [α] fast 20 mal so groß als für die Fraunhofer'sche Linie A (1882). Für Dextrose ist [α] = + 56°, für Levulose [α] = — 106°; deshalb ist der Invertzucker, der durch Kochen von Rohrzucker mit Mineralsäure erzeugt wird und aus gleichen Theilen Dextrose und Levulose besteht, links drehend. Beim Rohrzucker ist die Drehung der Säulenlänge oder Stoffmenge proportional und unabhängig von der Temp.; bei anderen Zuckerarten ist dieses wenigstens annähernd der Fall; in manchen Stoffen dagegen, wie z. B. Weinsäure nimmt die Drehnng bei der Verdünnung der Lösung zu, in anderen, wie z. B. alkoholischen Campherlösungen, bei der Verdichtung; im Allgemeinen hat höhere Temp. eine Schwächung des Drehungsvermögens zur Folge. Wo die Proportionalität gilt, läßt sich aus dem Drehungswinkel einer Lösung und dem Drehungsvermögen die gelöste Stoffmenge berechnen; in anderen Fällen treten Tabellen an die Stelle der Rechnung. Es handelt sich also nur darum, leicht zu handhabende Apparate für die Beobachtung der Drehung herzustellen; dieselben heißen im Allgemeinen Polarimeter, für die Bestimmung des Gehaltes einer Zuckerlösung Saccharimeter.

Das einfachste und billigste Polarimeter ist das Weinpolarimeter von Steeg (1878), das zur Erkennung der Fälschung von Wein mit künstlichem Traubenzucker und anderen ähnlichen Zwecken empfohlen wird, aber auch zur Beobachtung der Drehung der Polarisationsebene und ihres Gesetzes dienen kann. Dasselbe besteht (Fig. 247) aus dem

Fig. 247.



Nicol P als Polariseur und dem Nicol A als Analyseur, der Soleil'schen Doppelplatte Q, der Röhre R für die zu untersuchende Flüssigkeit und dem kleinen achromatischen Fernrohr F. Um den Apparat für eine Untersuchung einzustellen, nimmt man die Röhre heraus, stellt den Zeiger Z des Analyseurs auf Null, sieht nach einer Wolke und dreht den Polariseur, bis die beiden Hälften der Platte genau dasselbe Blau zeigen; dabei stellt man auch das Fernrohr für das Auge so ein, daß die Grenzlinie der Doppelplatte scharf sichtbar ist. Legt man nun irgend eine drehende Platte ein, so ist die Gleichheit der Farben gestört; die Drehung des Analyseurs, die man vornehmeu muß, um die Gleichheit der Hälften herzustellen, gibt die Drehung der Polarisationsebene der Größe nach an und läßt auch ihre Richtung erkennen; hat man mehrere Platten von 1, 2, 3mm Dicke, so ist auch leicht das Gesetz der Dicke wahrzunehmen. Will man einen Wein untersuchen, so füllt man denselben in die Röhre und bringt diese in den eingestellten Apparat. Wenn es ein junger, noch unvergohrener Wein ist, und wenn man den Analyseur rechts drehen muß, um die Gleichheit der Farbe herzustellen, so ist der Wein mit künstlichem Traubenzucker gallisirt; muß man aber links drehen, so enthält er nur natürlichen Traubenzucker; auch älterer rechts drehender Wein ist gallisirt, während links oder nicht drehender Wein ächt ist (Neubauer 1875). Denn der künstliche Traubenzucker ist stärker rechts drehend als reiner Traubenzucker, weil er noch stark rechts drehende Gummiarten enthält oder entwickelt, während der Traubenzucker des Mostes links drehend ist, weil er viel Levulose enthält. Es könnte nun allerdings diese Linksdrehung auch durch Invertirung von zugesetztem Rohrzucker mittels der Hefe entstanden sein; darüber gibt Aufschluß ein Zusatz von Salzsäure, die den noch vorhandenen Rohrzucker in linksdrehenden Invertzucker umwandelt; hierdurch wird die Linksdrehung verstärkt und die Fälschung mit Rohrzucker aufgedeckt, da der Traubenzucker diese Eigenschaft nicht hat.

Von den älteren Apparaten ist der einfachste der von Mitscherlich, der nur die Soleil'sche Doppelplatte nicht hat, sonst aber alle genannten Theile; da hier das dunkle Gesichtsfeld an die Stelle der empfindlichen Farbe tritt, so ist die Bestimmung weniger genau und erhält nur durch Anwendung von Natriumlicht einige Zuverlässigkeit. Größer ist dieselbe bei Soleils Saccharimeter (1847), das die genannten Elemente und die empfindliche Doppelplatte enthält; jedoch wird hier die Drehung der Polarisationsebene nicht direct gemessen, sondern die gleiche Färbung der beiden Plattenhälften wird durch Verschiebung eines Compensators hergestellt, der aus einer rechtsdrehenden Quarzplatte und zwei linksdrehenden Quarzkeilen besteht, alle drei senkrecht zur Achse geschliffen; wegen der Keilform können die Drehungen des Compensators sich aufheben, aber auch je nach der Stellung der Keile die linke oder die rechte Drehung zum Uebergewicht gelangen; aus der an einem Nonius auf 1/100mm genauen Ablesung der Verschiebung wird der Zuckergehalt gefunden.

Bei gefärbten Flüssigkeiten ist die Beobachtung des Farbenwechsels der empfindlichen Farben chwierig; deßhalb hat Soleil seinem Apparat noch den Illuminator beigegeben, durch velchen die Doppelplatte andere gleichmäßige Färbungen erhalten kann, unter denen die Rondscheinfarbe besonders empfohlen wird. Indessen ist unleugbar, daß Farbenbeobachtungen, jegenüber der so verbreiteten mangelhaften Farbenempfindung, etwas Unsicheres haben und er Beobachtung von Linien oder scharfen Lichtgrenzen nachstehen; darum haben die neuer-ings vielfach construirten Halbschatten-Sacharimeter Anklang gefunden; das von Laurent (1876) enthält auch Fernrohr, Analyseurnicol mit Vorrichtung zum Messen des Drehwinkels, Füllröhre, Polariseurnicol. Zwischen den beiden letzteren aber befindet sich ein reisförmiges Diaphragma, dessen eine Hälfte mit einer zur Achse parallel geschnittenen Quarzplatte ausgefüllt ist, deren Grenzdurchmesser ebenfalls zur Achse parallel läuft, und velche eine solche Dicke hat, daß die beiden senkrecht auf einander schwingenden Componenten ines doppelt gebrochenen Str. einen Phasenunterschied von einer halben Wellenlänge er-alten. Wegen des Phasenunterschiedes erscheint in der einen Grenzstellung des Analyseurs as kreisförmige Gesichtsfeld in der Quarzhälfte dunkel und in der Lufthälfte hell, während n der anderen Grenzstellung Umkehrung eintritt und in einer Zwischenstellung der gleich-näßige Halbschatten, der hier die empfindliche Farbe bildet, indem er bei einer Drehung der Polarisationsebene sich einem der beiden Grenzfälle nähert. Jellet hat für solche Apparate igene Halbschatten-Nicol hergestellt, wodurch dieselben etwas einfacher werden. Keiner aber rreicht die Genauigkeit von Wilds Polaristrobometer. Wie parallel mit der Achse ge-chliffene Quarzplatten für sich allein oder gekreuzt hyperbolische Curven bilden und senkrecht ur Achse geschnittene kreisförmige Curven, so zeigen zwei gekreuzte Quarzplatten, die unter Winkeln von 45° gegen die Achse geschliffen sind, in der Turmalinzange geradlinige Farben-treifen, deren mittlerer dunkel ist. Savart hat eine solche Kreuzplatte mit einer Turmalin-platte zu einem Polariskop verbunden, das selbst Spuren polarisirten Lichtes durch jene geraden Streifen erkennbar macht, und Wild schaltet eine solche Kreuzplatte, aus zwei 20mm icken Quarzplatten zusammengesetzt, zwischen zwei Nicol und ein Fernrohr mit Fadenkreuz in. In der Kreuz- und Parallelstellung sind die Streifen am stärksten sichtbar, in der Mittelstellung verschwinden sie ganz und lassen das Fadenkreuz zur scharfen Einstellung übrig. Bei Einschaltung eines drehenden Stoffes werden die Streifen wieder sichtbar, und die Größe er Drehung, die man an einer getheilten Trommel des Analyseurs mit Nonius genau blesen kann und die nothwendig ist, um das Fadenkreuz allein scharf sichtbar zu machen, st gleich der Drehung der Polarisationsebene.

Siebente Abtheilung.

Die Lehre von der Wärme.

1. Definitionen der Wärmelehre.

386 **Begriff und Wesen der Wärme** (Melloni 1835, Mayer 1842). Im ge-wöhnlichen Leben versteht man unter Wärme die Kraft, welche in unserem Körper Empfindungen erweckt, die wir mit den Ausdrücken heiß, warm, lau, kühl, kalt be-eichnen. Heiß, warm nennen wir einen Körper, wenn er uns sehr viel oder viel Wärme abgibt, lau, wenn wir keine Wärme von ihm empfangen, kühl, kalt, wenn er uns Wärme entzieht; das letzte ist der Fall, wenn wir wärmer sind als der Körper, as erste, wenn der Körper wärmer ist als wir. Wir empfangen alsdann nicht los Wärme von ihm durch Berührung, sondern auch durch blose Annäherung, selbst wenn zwischen uns und ihm ein luftleerer Raum ist. Die Wärme, die wir durch Berührung empfangen, können wir auch erhalten, wenn wir den warmen Körper mit einem anderen berühren; wir empfangen sie aber dann erst, wenn der zweite Körper selbst warm geworden ist, was längere Zeit andauert; wir nennen diese angsam von Körper zu Körper fortschreitende oder geleitete Wärme auch Körper-wärme. Die Wärme dagegen, die wir bei der Annäherung selbst durch den leeren Raum hindurch empfinden, aber auch durch die Luft und durch andere Körper, flanzt sich blitzschnell durch den leeren Raum und die Körper fort, wie sich z. B. ie Wärme der hinter Wolken hervortretenden Sonne sofort hinter einem Fenster

fühlbar macht; sie pflanzt sich fort, ohne den leeren Raum oder die Körper, durch welche sie geht, zu erwärmen; wir nennen sie strahlende Wärme. Strahlende Wärme tritt mit Licht verbunden, wie auch ohne Licht auf; man unterscheidet also leuchtende und dunkle strahlende Wärme.

Die strahlende Wärme besteht aus transversalen Aetherschwingungen; die Körperwärme aus Molekularbewegungen der Körper.

Daß die strahlende Wärme aus transversalen Aetherschw. besteht, also dem Lichte identisch ist, folgerte Melloni aus dem ganz gleichen Verhalten der strahlenden Wärme und des Lichtes. Die strahlende Wärme pflanzt sich in einem isotropen Medium nach allen Richtungen in geraden Linien fort, die man Wärmestrahlen nennt; die Fortpflanzung geschieht im leeren Raume und in der Luft mit derselben Geschw. wie beim Lichte. Die Wärmestr. werden von glatten Flächen nach dem Reflexionsgesetze zurückgeworfen, von rauhen diffundirt, von durchsichtigen nach dem Brechungsgesetze abgelenkt. Str. von verschieden hohen Schwzn., die man auch Wärmefarben nennt, werden von verschiedenen Körpern in verschiedener Weise durchgelassen, absorbirt und diffundirt. Die Wärmestr. zeigen wie die Lichtstr. die Erscheinungen der Interferenz, der doppelten Brechung, der Polarisation, ja sogar der circularen Polarisation. Dadurch ist ihre Identität mit Lichtstr. zweifellos; die dunklen Wärmestr., wenigstens die der Sonne, liegen zwischen 60 und 400 Bill., die leuchtenden gehen bis zu 800 Bill. Schw. (439. bis 446.).

387 Daß die Körperwärme aus Molekularbewegungen besteht, nicht aber, wie man früher annahm, ein abstoßender, höchst feiner, alles durchdringender Stoff ist, dafür lassen sich folgende Gründe anführen:

1. **Die Verwandlung von strahlender Wärme in Körperwärme und von Körperwärme in strahlende Wärme.** Fallen auf einen Körper Wärmestr., so wird seine Temp. erhöht, d. h. es wird Körperwärme erzeugt; umgekehrt sendet jeder Körper fortwährend Wärmestr. nach allen Richtungen aus. Nun ist es aber nicht möglich, daß sich Stoff in Bewegung und Bewegung in Stoff verwandele; was aus Bewegung entsteht, muß wieder Bewegung sein, und umgekehrt, was Bewegung erzeugt, muß ebenfalls Bewegung sein; so verlangt es nicht blos das Princip der Erhaltung der Kraft, sondern auch tagtägliche, tausendfältige Erfahrung. Folglich muß die aus der Bewegung der strahlenden Wärme entstehende, und umgekehrt, die Bewegung der strahlenden Wärme erzeugende, Körperwärme ebenfalls Bewegung sein.

2. **Die Erzeugung einer unbegrenzten Wärmemenge aus begrenzter Stoffmenge durch Bewegung.** Rumford ließ (1798) einen stumpfen Stahlmeißel fest auf den Boden eines Kanonenrohres, das in einem mit Wasser gefüllten Kasten stand, aufpressen und das Rohr durch einen Pferdegöpel drehen; das Wasser kam bald zum Kochen und kochte, so lange die Bewegung dauerte, obwohl von außen her unmöglich Wärme zutreten konnte. Man könnte diesen Versuch jahrelang fortsetzen, immer neues Wasser allmälig zugießen, um das verdampfte zu ersetzen, und würde so eine unbegrenzte Wärmemenge aus dem begrenzten Meißel und Kanonenrohr erhalten. Dieser Versuch ist undenkbar, wenn die Wärme ein Stoff ist, weil eine begrenzte Stoffmenge unmöglich eine unbegrenzte Wärmestoffmenge entwickeln kann. Dagegen wird bei diesem Versuche dem Apparat fortwährend Bewegung, lebendige Kraft zugeführt und fortwährend Wärme an Stelle derselben gewonnen, folglich muß die Wärme selbst Bewegung sein.

3. **Die Aequivalenz von Wärme und Arbeit.** Eine Wärmeeinheit oder Calorie (1^c) ist diejenige Wärmemenge, welche nöthig ist, um die Temp. von 1^{kg} Wasser um $1°$ zu erhöhen. Das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit ist 424^{mk}, d. h. wenn 1^c in Arbeit verwandelt wird, so entstehen immer 424^{mk}, und wenn 1^{mk} Arbeit in Wärme verwandelt wird, so entsteht immer $1/_{424}{}^c$. Was sich so regelmäßig in einander verwandelt, unter allen Umständen in denselben Mengenverhältnissen, muß innerlich identisch sein; die Arbeit nun ist Bewegung, folglich muß die Wärme auch Bewegung sein. Das mechanische Aequivalent der Wärme wurde schon annähernd von Rumford aus den Ergebnissen seines Versuches berechnet. Mayer nahm (1842) die Rechnung wieder auf, benutzte aber die Thatsache, daß zur Erwärmung von Luft, die während der Erwärmung unter dem äußeren Luftdrucke steht, also denselben überwinden muß, 1,41 mal so viel Wärme nöthig ist, als zur Erwärmung von Luft, die in ein constantes Volumen eingeschlossen ist. Die ausgedehntesten Versuchsrechnungen stellte Joule (1843—1850) an; er preßte Wasser durch capillare Röhren und bestimmte die durch Reibung erzeugte Wärmemenge; er stellte einen Metallbehälter in eine abgemessene Wassermenge, preßte mittels einer Compressionspumpe Luft bis zu 22^{at} in den Behälter und maß dann die Temperaturzunahme, welche durch das Zu-

ammendrücken der Luft hervorgebracht wurde. Er ließ durch an Schnüren hängende, fallende Gewichte zwei auf Frictionsrollen ruhende Achsen in Drehung versetzen, auf denen große Rollen saßen; durch Umdrehung derselben wickelten sich Schnüre von einer Trommel ab, welche mit sich eine verticale Welle drehte, an der im Innern eines Kastens Schaufelarme efestigt waren. Der Kasten war mit Wasser oder Quecksilber oder Walrathöl gefüllt und egen Verlust und Zuführung von Wärme geschützt; Joule konnte durch die Temperaturrhöhung der von den Schaufelarmen geschlagenen Flüssigkeiten und den Fall der Gewichte en Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit berechnen. Auch die Reibung fester Körper enutzte Joule zu dieser Berechnung; an die verticale Welle wurde statt der Schaufeln ein egelförmiges Stück Gußeisen befestigt, das gegen ein anderes kegelförmig ausgehöhltes Gußisenstück gepreßt und dann in der erwähnten Weise gedreht wurde, während der Kasten mit Quecksilber gefüllt war; durch die Reibung der beiden Gußeisenstücke an einander entstand Wärme, deren Menge aus der Temperaturzunahme des Quecksilbers gefunden werden konnte. Alle diese verschiedenen Methoden ergaben dasselbe Resultat. Seit Joule sind noch mancherlei Versuche unternommen worden, welche sämmtlich ebenfalls denselben Werth ergaben, den Redtenbacher, Clausius, Person u. A. auch aus theoretischen Betrachtungen ableiteten. Hirn and (1865) dieselbe Zahl durch Stoßversuche; er ließ ein Eisenpendel gegen ein Holzpendel chlagen, das einen hohlen Bleicylinder trug, dessen Erwärmung durch sofort nach dem Stoße eingefülltes Wasser erkannt wurde. Die neueste Bestimmung (Cantoni und Gerosa 882) ist auch die einfachste. Quecksilber fiel aus einem Trichter durch eine lange Röhre in in Gefäß, wo seine Temperatursteigerung gemessen wurde, welche die Zahl 423,82 ergab. — Dieselbe Zahl ergaben auch umgekehrte Versuche, welche nämlich die Arbeit zu bestimmen uchten, die von einer Calorie geleistet wird. Hirn (1858) berechnete die Wärmemenge, die in em Dampfe enthalten war, welcher auf eine hundertpferdige Dampfmaschine wirkte; nach der Wirkung wurde der Dampf condensirt und die in dem Wasser noch vorhandene Wärmemenge berechnet; es ergab sich, daß die Wärmemenge geringer war, denn sie war zur Arbeit verbraucht worden, deren Größe man durch das Bremsdynamometer ermittelt hatte; s ergab sich, daß an Stelle jeder verschwundenen Calorie 424mk Arbeit entstanden waren.

4. Wenn bei einer Veränderung keine Arbeit geleistet oder verbraucht wird, so wird uch keine Wärme verbraucht oder erzeugt. Joule (1845) hatte in einem Gefäße Luft von 22at und ließ dieselbe durch Oeffnen eines Hahnes in ein anderes luftleeres Gefäß strömen; a diese strömende Luft keinen Druck zu überwinden hat, so leistet sie keine Arbeit und verehrt keine; es ist dann weder eine Erniedrigung noch eine Erhöhung der Temp. bemerkbar. Wäre die Wärme ein Stoff, so müßte bei diesem Versuche die Dichte des Stoffes, d. i. die Temp. vermindert werden. Da dieses nicht stattfindet, so spricht dieser Versuch ebenso gegen ie Stofftheorie der Wärme, wie er für die Identität derselben mit Arbeit, mit Bewegung ntscheidet. — Die so eben vorgetragene Ansicht über das Wesen der Wärme sammt den zu Grunde liegenden Thatsachen und den sich daraus ergebenden Folgerungen nennt man die mechanische Wärmetheorie.

Die Art der Bewegung, die wir Wärme nennen (Clausius 1857). Daß 388 die Wärme eine Molekularbewegung ist, kann nach dem Vorausgehenden nicht mehr zweifelhaft sein. Die Intensität der Wärme oder die Temperatur ist durch die Heftigkeit der Bewegung, d. i. die lebendige Kraft der Moleküle bedingt. Die absolute Temperatur, d. i. die Temperatur von dem Punkte an gerechnet, wo ein Körper gar keine Wärme enthält, wo also seine Moleküle in Ruhe und unmittelbarer Berührung sind, ist die lebendige Kraft der Moleküle. Der Zustand, in welchem die Moleküle eines Körpers keine Bewegung haben und sich unmittelbar berühren, ist der absolute Nullpunkt, der Punkt absoluter Kälte; er liegt (nach später folgender Berechnung) bei — 273° C. Die Wärmemenge, die ein Körper bei einer beliebigen Temperatur enthält, besteht nicht blos aus der gesammten lebendigen Kraft aller seiner Moleküle, sondern auch aus der Arbeit in Wärme ausgedrückt, welche nöthig war, um die Moleküle und Atome in die bei dieser Temperatur stattfindende Entfernung von einander zu bringen, um durch Ueberwindung der molekularen Anziehung dem Körper seine jetzige Disgregation zu verleihen. Die erste Wärmemenge, der Wärme-Inhalt, und die letztere, die innere Arbeit des Körpers, bilden zusammen die Energie desselben. — Ueber die Art der Molekularbewegung bei den verschiedenen Körpern sind die Forscher noch nicht einig, doch gewinnt die Ansicht von Clausius immer mehr Ausbreitung. Nach dieser haben die Moleküle fester Körper eine schwingende Bewegung um ihr stabile Gleich-

gewichtslage; die Moleküle flüssiger Körper haben eine so starke schwingende Bewegung, daß ein Molekül, z. B. durch einen Stoß der Nachbarmoleküle, jeden Augenblick im Begriffe ist, seine Gleichgewichtslage zu verlassen, um dann zu anderen Molekülen in dieselbe labile Gleichgewichtslage zu kommen; die Moleküle der Luftarten sind dagegen in fortschreitender Bewegung, welche sie so lange in gerader Linie fortsetzen, bis sie gegen ein anderes Molekül oder gegen eine feste Wand stoßen, um dann eine andere gerade Richtung einzuschlagen. Bei den festen Körpern sind die Moleküle einander am nächsten; daher ist die Anziehung derselben gegen einander stark und in stabilem Gleichgewichte mit ihrer lebendigen Kraft; bei den flüssigen Körpern sind die Moleküle weiter von einander entfernt, die Anziehung ist geringer und in leicht veränderlichem, labilem Gleichgewichte mit der lebendigen Kraft der Moleküle; in den Luftarten endlich sind die Moleküle sehr weit von einander entfernt, ihre Anziehung ist daher verschwindend klein und weit überwogen durch die lebendige Kraft der fortschreitenden Molekularbewegung.

Wir haben aus dieser Hypothese die Grundeigenschaften der flüssigen und luftförmigen Körper (s. 53.—55., sowie 152. und 184.) in einfachster Weise abgeleitet; ebenso ergeben sich alle Wärme-Erscheinungen einfach aus derselben, wodurch sie sehr an Wahrscheinlichkeit gewinnt. Andere Hypothesen wurden aufgestellt von Redtenbacher, der die Wärme in radialen Schw. der Aetheratome sucht, von Davy und Rankine, welche sie als eine Rotationsbewegung der Körpermol. betrachten, von Wiener, der sie aus Schw. der Körper- und Aetheratome bestehen läßt u. s. w. — Indessen ist auch in der Theorie von Clausius die Bewegungsart nicht so einfach, wie es oben für den Anfänger dargestellt wurde; bei den Mol. der festen Körper könnten, meint Clausius, auch drehende Bewegungen vorkommen und die Atome eines Mol. könnten in den verschiedenartigsten Bewegungen innerhalb des Mol. begriffen sein; in den flüssigen Körpern seien diese Bewegungen der Bestandtheile der Mol. ebenfalls vorhanden neben der schwingenden, wälzenden und fortschreitenden Bewegung derselben; für die Gasmol. berechnet Clausius, daß die leb. Kft. der fortschreitenden Bewegung nur 63% ihres Wärme-Inhaltes ausmache, und daß der Rest des Wärme-Inhaltes in der leb. Kft. der Bestandtheile der Mol., ja sogar des Aethers zu suchen sei. Für die fortschreitende Bewegung der Wasserstoffmol. bei 0° C. findet Clausius die Geschw. 1844^m, woraus, da $^1/_2 mv^2$ für alle Gase bei gleicher Temp. denselben Werth besitzen muß, sich die molekulare Geschw. anderer Gase leicht berechnen läßt; für O ergibt sich 461^m, für N 492^m. Indessen legen die Mol. nicht alle diese großen Wege in 1 Sec. zurück, sondern nach Clausius nur etwa 37%, weil die übrigen, in die Wirkungssphäre der Abstoßung anderer Mol. gelangend, von diesen eine Verminderung ihrer Geschw. erfahren. Inzwischen hat man die mittleren Wege der Gasmol. zwischen je zwei Reflexionen und dadurch den Abstand der Mol. von einander berechnet, und nach verschiedenen Methoden überraschend zusammenstimmende Resultate erhalten. Für H 222, O 114, Luft 108$^{\mu\mu}$, also für Luft im Mittel etwa $^1/_{10\,000}$^{mm}. Hieraus hat Loschmidt die Durchmesser der Mol. berechnet und fand für H 4, für O 7, für N 8 Hundertmilliontel^{mm} oder auch 4, 7, 8 Zehntel$^{\mu\mu}$, nahe 1$^{\mu\mu}$. Die Resultate von O. E. Meyer u. van der Waals stimmen hiermit ziemlich überein; noch mehr die von Dorn (1881) mittels der Dielektricitätsconstante gefundenen Resultate. De Heen berechnete (1880) den Dm. eines Wassermol. zu $75 \,.\, 10^{-9 mm}$, sogar kaum $^1/_{10}$$^{\mu\mu}$.

2. Die Entstehung der Wärme oder die Wärmequellen.

389 1. **Wärme durch Arbeit** (Joule 1843—1850). Arbeit wird in Wärme verwandelt, wenn sie als Arbeit verschwindet; die Verwandlung besteht darin, daß eine Körperbewegung in eine Molekularbewegung übergeht. Gewöhnlich geschieht dies dadurch, daß eine Körperbewegung durch einen anderen Körper plötzlich ganz oder theilweise gehemmt wird, weil dieser andere Körper sich entweder nicht als Ganzes bewegen kann, oder weil er selbst eine entgegengesetzte Bewegung hat, oder weil nicht genug Zeit vorhanden ist, um die Bewegung auf alle Körpertheile zu übertragen; es werden dann die getroffenen Theilchen voran gestoßen, durch den Widerstand des Körpers zurückgeworfen und dann wieder voran gestoßen, wodurch sie in Schwingungen gerathen. Die Verwandlung geschieht immer nach dem Gesetze der Aequivalenz, für jedes verschwundene Meterkilogramm Arbeit entsteht

/124 = A°. **Arbeit geht als solche verloren bei der Reibung, beim Stoße, beim Zusammendrücken, wie überhaupt durch jede Verminderung der Disgregation und urch gehemmte Bewegung.**

Daß überhaupt durch Arbeit Wärme erzeugt wird, war schon seit den ältesten Zeiten ekannt (s. S. 8). Davy brachte (1812) zwei Eisstücke durch Reiben an einander zum chmelzen. Mayer erwärmte (1842) Wasser durch Schütteln von 12 auf 13°. Interessant nd die Versuche Tyndalls, weil sie die Entstehung von Wärme schon durch geringe Arbeit nd umgekehrt sichtbar machen (1862); er benutzte hierzu das feinste Thermometer, eine hermosäule mit Thermomultiplicator. Er hielt ein kaltes Stück Holz an die Säule; die adel bewegte sich dann; aber sofort schlug sie die entgegengesetzte Richtung ein, wenn er as Stück Holz nur ein wenig reibend bewegte; dasselbe zeigte sich, wenn er mit einem Stücke Messing zuerst die Säule berührte und dann nach der Reibung desselben an einem Stücke alten Holzes abermals, oder mit einem Rasirmesser vor und nach dem Schleifen oder mit inem Stücke Tannenholz vor und nach einer starken Pressung, oder mit einer Bleikugel vor nd nach einem Hammerschlag auf dieselbe, oder mit Quecksilber, bevor und nachdem es inigemale aus einem Glase in ein anderes gegossen worden war. Er brachte Wasser in einer uf die Schwungmaschine geschraubten kleinen Messingröhre zum Sieden, indem er die Röhre ährend der Drehung zwischen eine Eichenholzzange quetschte. Er blies mit einem Blasebalge uft gegen die Säule, so daß sie an derselben sich rieb, und bemerkte Erwärmung; ließ er agegen zusammengepreßte Luft frei in den Luftraum strömen, so bemerkte er Abkühlung, eil hier die Luft eine Arbeit vollbringt, nämlich den Druck der äußeren Luft überwindet; asselbe zeigt sich vor und nach dem Oeffnen eines Siphons. Hier tritt also eine Verwandung von Wärme in Arbeit zu Tage. Würde man dagegen die Thermosäule in ein luftleeres efäß setzen, in welches man Luft aus einem anderen Gefäße einströmen ließe, so würde ine Bewegung der Nadel wahrgenommen werden, weil jetzt weder Arbeit verzehrt noch geistet wird. Diese drei Versuche sind besonders lehrreich und verdienen eingehende Beachtung.

Eine Geschützkugel erwärmt sich auf ihrem Wege durch die Luft theilweise durch die eibung, hauptsächlich aber durch die Wärme, welche durch Zusammenpressung der Luft entteht; auf dieselbe Weise erklärt man die Wärme, welche die Sternschnuppen und Feuerkugeln lühend und daher sichtbar macht. Daß durch Zusammenpressen von Luft Wärme ntsteht, beweist besonders deutlich das pneumatische Feuerzeug; dasselbe besteht us einem starken Glascylinder, in den ein Kolben mit einem Handgriffe luftdicht paßt; ößt man den Kolben rasch nieder, so entsteht so viel Hitze, daß sich ein Stückchen Zunder der Schießwolle entzündet, das man an die Unterseite des Kolbens befestigt hatte. Die on Shaw (1870) erbaute amerikanische Pulverramme ist eine direkte Anwendung es pneumatischen Feuerzeugs und eine interessante Ueberführung der mechanischen Wärmeheorie in das practische Leben. Auf den einzurammenden Pfahl wird ein Mörser befestigt, ber welchen senkrecht in einiger Höhe ein eiserner Rammbär schwebt, von der Form eines iesigen Eisenstöpsels, der in den Mörser eben paßt. In den Mörser wird Pulver gebracht, nd nach seiner Auslösung fällt der Rammbär in den Mörser, verdichtet die Luft und erzeugt oviel Wärme, daß sich das Pulver entzündet. Die leb. Kft. der Explosionsgase schleudert en Rammbär wieder in die Höhe, treibt aber auch gleichzeitig den Pfahl mit größerer Kraft n den Boden, als es der fallende Klotz vermöchte. Nach sofortiger Einschüttung von neuem ulver fällt der Bär wieder herab, bewirkt wieder eine Explosion und fliegt wieder hinauf . s. w.; das Einrammen geschieht in überraschend kurzer Zeit. Hier verwandelt sich die eb. Kft. des fallenden Bärs in Wärme, diese entfesselt die Spannkraft des Schießpulvers, elche in Gestalt von Luftspannung d. i. durch die leb. Kft. der Luftmol. die Arbeit des inrammens und des Hebens des Rammbärs vollbringt.

Umgekehrt entsteht Abkühlung, wenn sich ausdehnende Luft bei ihrer Ausehnung Arbeit leistet. Dies zeigt der vorhin angeführte Tyndall'sche Versuch; jedoch ritt diese Erscheinung schon bei dem Auspumpen von Luft auf, weil die ausströmende Luft urch Ueberwindung des Luftdruckes Arbeit producirt und daher Wärme consumirt. Am uffallendsten ist dies wieder mittels einer Thermosäule wahrnehmbar, die man gegen die Band eines Metallgefäßes lehnt, aus dem man die Luft pumpt; die Nadel geht beim Ausumpen stark zurück und beim Einströmen wieder voran. Eine Luftpumpenglocke trübt sich ährend des Auspumpens, weil sich durch die Abkühlung der Wasserdampf in derselben ondensirt und daher eine Dunstwolke bildet, die indeß beim Einströmen wieder verschwindet urch die Wärme, welche die Arbeit des äußeren Luftdruckes dann erzeugt. Läßt man bei em Wassertrommelgebläse die Luft erst nach stärkerer Verdichtung ausströmen, so fällt der Bassердunst als Schnee zu Boden, und die Röhre bedeckt sich mit Eiszapfen.

Eine höchst interessante Anwendung dieser Folgerung aus der mechanischen Wärmeheorie ist Windhausens Kälte-Erzeugungs-Maschine (1872), welche mannigfache ortheilhafte Verwendbarkeit besitzt; denn diese Maschine ist im Stande, bei Anwendung

fühlbar macht; sie pflanzt sich fort, ohne den leeren Raum oder die Körper, durch welche sie geht, zu erwärmen; wir nennen sie strahlende Wärme. Strahlende Wärme tritt mit Licht verbunden, wie auch ohne Licht auf; man unterscheidet also leuchtende und dunkle strahlende Wärme.

Die strahlende Wärme besteht aus transversalen Aetherschwingungen; die Körperwärme aus Molekularbewegungen der Körper.

Daß die strahlende Wärme aus transversalen Aetherschw. besteht, also dem Lichte identisch ist, folgerte Melloni aus dem ganz gleichen Verhalten der strahlenden Wärme und des Lichtes. Die strahlende Wärme pflanzt sich in einem isotropen Medium nach allen Richtungen in geraden Linien fort, die man Wärmestrahlen nennt; die Fortpflanzung geschieht im leeren Raume und in der Luft mit derselben Geschw. wie beim Lichte. Die Wärmestr. werden von glatten Flächen nach dem Reflexionsgesetze zurückgeworfen, von rauhen diffundirt, von durchsichtigen nach dem Brechungsgesetze abgelenkt. Str. von verschieden hohen Schwzn., die man auch Wärmefarben nennt, werden von verschiedenen Körpern in verschiedener Weise durchgelassen, absorbirt und diffundirt. Die Wärmestr. zeigen wie die Lichtstr. die Erscheinungen der Interferenz, der doppelten Brechung, der Polarisation, ja sogar der circularen Polarisation. Dadurch ist ihre Identität mit Lichtstr. zweifellos; die dunklen Wärmestr., wenigstens die der Sonne, liegen zwischen 60 und 400 Bill., die leuchtenden gehen bis zu 800 Bill. Schw. (439. bis 446.).

387 Daß die Körperwärme aus Molekularbewegungen besteht, nicht aber, wie man früher annahm, ein abstoßender, höchst feiner, alles durchdringender Stoff ist, dafür lassen sich folgende Gründe anführen:

1. Die Verwandlung von strahlender Wärme in Körperwärme und von Körperwärme in strahlende Wärme. Fallen auf einen Körper Wärmestr., so wird seine Temp. erhöht, d. h. es wird Körperwärme erzeugt; umgekehrt sendet jeder Körper fortwährend Wärmestr. nach allen Richtungen aus. Nun ist es aber nicht möglich, daß sich Stoff in Bewegung und Bewegung in Stoff verwandele; was aus Bewegung entsteht, muß wieder Bewegung sein, und umgekehrt, was Bewegung erzeugt, muß ebenfalls Bewegung sein; so verlangt es nicht blos das Princip der Erhaltung der Kraft, sondern auch tagtägliche, tausendfältige Erfahrung. Folglich muß die aus der Bewegung der strahlenden Wärme entstehende, und umgekehrt, die Bewegung der strahlenden Wärme erzeugende, Körperwärme ebenfalls Bewegung sein.

2. Die Erzeugung einer unbegrenzten Wärmemenge aus begrenzter Stoffmenge durch Bewegung. Rumford ließ (1798) einen stumpfen Stahlmeißel fest auf den Boden eines Kanonenrohres, das in einem mit Wasser gefüllten Kasten stand, aufpressen und das Rohr durch einen Pferdegöpel drehen; das Wasser kam bald zum Kochen und kochte, so lange die Bewegung dauerte, obwohl von außen her unmöglich Wärme zutreten konnte. Man könnte diesen Versuch jahrelang fortsetzen, immer neues Wasser allmälig zugießen, um das verdampfte zu ersetzen, und würde so eine unbegrenzte Wärmemenge aus dem begrenzten Meißel und Kanonenrohr erhalten. Dieser Versuch ist undenkbar, wenn die Wärme ein Stoff ist, weil eine begrenzte Stoffmenge unmöglich eine unbegrenzte Wärmestoffmenge entwickeln kann. Dagegen wird bei diesem Versuche dem Apparat fortwährend Bewegung, lebendige Kraft zugeführt und fortwährend Wärme an Stelle derselben gewonnen, folglich muß die Wärme selbst Bewegung sein.

3. Die Aequivalenz von Wärme und Arbeit. Eine Wärmeeinheit oder Calorie (1^c) ist diejenige Wärmemenge, welche nöthig ist, um die Temp. von 1^{kg} Wasser um 1^0 zu erhöhen. Das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit ist 424^{mk}, d. h. wenn 1^c in Arbeit verwandelt wird, so entstehen immer 424^{mk}, und wenn 1^{mk} Arbeit in Wärme verwandelt wird, so entsteht immer $^1/_{424}{}^c$. Was sich so regelmäßig in einander verwandelt, unter allen Umständen in denselben Mengenverhältnissen, muß innerlich identisch sein; die Arbeit nun ist Bewegung, folglich muß die Wärme auch Bewegung sein. Das mechanische Aequivalent der Wärme wurde schon annähernd von Rumford aus den Ergebnissen seines Versuches berechnet. Mayer nahm (1842) die Rechnung wieder auf, benutzte aber die Thatsache, daß zur Erwärmung von Luft, die während der Erwärmung unter dem äußeren Luftdrucke steht, also denselben überwinden muß, 1,41 mal so viel Wärme nöthig ist, als zur Erwärmung von Luft, die in ein constantes Volumen eingeschlossen ist. Die ausgedehntesten Versuchsrechnungen stellte Joule (1843—1850) an; er preßte Wasser durch capillare Röhren und bestimmte die durch Reibung erzeugte Wärmemenge; er stellte einen Metallbehälter in eine abgemessene Wassermenge, preßte mittels einer Compressionspumpe Luft bis zu 22^{at} in den Behälter und maß dann die Temperaturzunahme, welche durch das Zu-

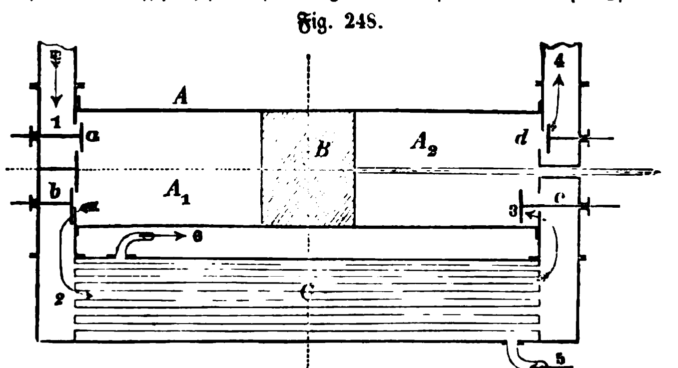
sammendrücken der Luft hervorgebracht wurde. Er ließ durch an Schnüren hängende, fallende Gewichte zwei auf Frictionsrollen ruhende Achsen in Drehung versetzen, auf denen große Rollen saßen; durch Umdrehung derselben wickelten sich Schnüre von einer Trommel ab, welche mit sich eine verticale Welle drehte, an der im Innern eines Kastens Schaufelarme befestigt waren. Der Kasten war mit Wasser oder Quecksilber oder Walrathöl gefüllt und gegen Verlust und Zuführung von Wärme geschützt; Joule konnte durch die Temperaturerhöhung der von den Schaufelarmen geschlagenen Flüssigkeiten und den Fall der Gewichte den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit berechnen. Auch die Reibung fester Körper benutzte Joule zu dieser Berechnung; an die verticale Welle wurde statt der Schaufeln ein kegelförmiges Stück Gußeisen befestigt, das gegen ein anderes kegelförmig ausgehöhltes Gußeisenstück gepreßt und dann in der erwähnten Weise gedreht wurde, während der Kasten mit Quecksilber gefüllt war; durch die Reibung der beiden Gußeisenstücke an einander entstand Wärme, deren Menge aus der Temperaturzunahme des Quecksilbers gefunden werden konnte. Alle diese verschiedenen Methoden ergaben dasselbe Resultat. Seit Joule sind noch mancherlei Versuche unternommen worden, welche sämmtlich ebenfalls denselben Werth ergaben, den Redtenbacher, Clausius, Person u. A. auch aus theoretischen Betrachtungen ableiteten. Hirn fand (1865) dieselbe Zahl durch Stoßversuche; er ließ ein Eisenpendel gegen ein Holzpendel schlagen, das einen hohlen Bleicylinder trug, dessen Erwärmung durch sofort nach dem Stoße eingefülltes Wasser erkannt wurde. Die neueste Bestimmung (Cantoni und Gerosa 1882) ist auch die einfachste. Quecksilber fiel aus einem Trichter durch eine lange Röhre in ein Gefäß, wo seine Temperatursteigerung gemessen wurde, welche die Zahl 423,82 ergab. — Dieselbe Zahl ergaben auch umgekehrte Versuche, welche nämlich die Arbeit zu bestimmen suchten, die von einer Calorie geleistet wird. Hirn (1858) berechnete die Wärmemenge, die in dem Dampfe enthalten war, welcher auf eine hundertpferdige Dampfmaschine wirkte; nach der Wirkung wurde der Dampf condensirt und die in dem Wasser noch vorhandene Wärmemenge berechnet; es ergab sich, daß die Wärmemenge geringer war, denn sie war zur Arbeit verbraucht worden, deren Größe man durch das Bremsdynamometer ermittelt hatte; es ergab sich, daß an Stelle jeder verschwundenen Calorie 424^{mk} Arbeit entstanden waren.

4. Wenn bei einer Veränderung keine Arbeit geleistet oder verbraucht wird, so wird auch keine Wärme verbraucht oder erzeugt. Joule (1845) hatte in einem Gefäße Luft von 22^{at} und ließ dieselbe durch Oeffnen eines Hahnes in ein anderes luftleeres Gefäß strömen; da diese strömende Luft keinen Druck zu überwinden hat, so leistet sie keine Arbeit und verzehrt keine; es ist dann weder eine Erniedrigung noch eine Erhöhung der Temp. bemerkbar. Wäre die Wärme ein Stoff, so müßte bei diesem Versuche die Dichte des Stoffes, d. i. die Temp. vermindert werden. Da dieses nicht stattfindet, so spricht dieser Versuch ebenso gegen die Stofftheorie der Wärme, wie er für die Identität derselben mit Arbeit, mit Bewegung entscheidet. — Die so eben vorgetragene Ansicht über das Wesen der Wärme sammt den zu Grunde liegenden Thatsachen und den sich daraus ergebenden Folgerungen nennt man die *mechanische Wärmetheorie*.

388 **Die Art der Bewegung, die wir Wärme nennen** (Clausius 1857). Daß die Wärme eine Molekularbewegung ist, kann nach dem Vorausgehenden nicht mehr zweifelhaft sein. Die Intensität der Wärme oder die Temperatur ist durch die Heftigkeit der Bewegung, d. i. die lebendige Kraft der Moleküle bedingt. Die absolute Temperatur, d. i. die Temperatur von dem Punkte an gerechnet, wo ein Körper gar keine Wärme enthält, wo also seine Moleküle in Ruhe und unmittelbarer Berührung sind, ist die lebendige Kraft der Moleküle. Der Zustand, in welchem die Moleküle eines Körpers keine Bewegung haben und sich unmittelbar berühren, ist der absolute Nullpunkt, der Punkt absoluter Kälte; er liegt (nach später folgender Berechnung) bei — 273° C. Die Wärmemenge, die ein Körper bei einer beliebigen Temperatur enthält, besteht nicht blos aus der gesammten lebendigen Kraft aller seiner Moleküle, sondern auch aus der Arbeit in Wärme ausgedrückt, welche nöthig war, um die Moleküle und Atome in die bei dieser Temperatur stattfindende Entfernung von einander zu bringen, um durch Ueberwindung der molekularen Anziehung dem Körper seine jetzige Disgregation zu verleihen. Die erste Wärmemenge, der Wärme-Inhalt, und die letztere, die innere Arbeit des Körpers, bilden zusammen die Energie desselben. — Ueber die Art der Molekularbewegung bei den verschiedenen Körpern sind die Forscher noch nicht einig, doch gewinnt die Ansicht von Clausius immer mehr Ausbreitung. Nach dieser haben die Moleküle fester Körper eine schwingende Bewegung um ihr stabile Gleich-

einer Dampfmaschine oder eines anderen Motors von 6 bis 20° stündlich 500 bis 5000cbm Luft von 40 bis 100° Kälte zu erzeugen. Die Fig. 248, eine Skizze der Haupttheile, kann eine Idee von der Wirkungsweise der Maschine geben. Der Kolben B wird in dem Cylinder A durch die Dampfmaschine nach rechts und durch diese und die comprimirte Luft nach links geschoben. Bei der Bewegung nach rechts öffnet sich das Saugventil a, und es strömt Luft von atmosphärischer Spannung in den Cylinderraum A_1. Ist der Cylinder ganz erfüllt, so geht der Kolben nach links, die Luft wird bis zu etwa 2^{at} comprimirt, schließt das Saugventil a, öffnet das Druckventil b und strömt in der Pfeilrichtung 2 in den Kühler C. Durch ihre Compression ist sie nämlich stark erhitzt worden und muß daher einer Abkühlung unterworfen werden, welche durch das bei 5 ein- und bei 6 ausströmende Wasser vollbracht wird.

Fig. 248.



Die so abgekühlte und comprimirte Luft gelangt durch das von einer Steuerung geöffnete Ventil c in den Cylinderraum A_2 und verrichtet hier gemeinschaftlich mit der Dampfmaschine die Arbeit der Linksbewegung des Kolbens und der Compression in A_1; da das Ventil c bei einer gewissen Kolbenstellung geschlossen wird, so dehnt sie sich hierbei aus und kühlt sich bis tief unter den Eispunkt ab. Bei der folgenden Rechtsbewegung des Kolbens fließt die kalte Luft durch das Auslaßventil d an ihren Bestimmungsort. Strömt dieselbe z. B. in den feuchte Luft enthaltenden Maschinenraum, so füllt sich derselbe bald mit Schneeflocken. Mittels dieser Maschine läßt sich selbst im Sommer eine Schlittschuhbahn herstellen.

Merkwürdig ist die Wärmebildung durch Reibung im magnetischen Felde; hängt man zwischen den beiden Polen eines kräftigen Hufeisen-Elektromagnetes eine Silbermünze an einem Faden auf, so verliert dieselbe bei geschlossenem Strome ihre freie Beweglichkeit und wird warm, wenn man sie mit Gewalt dreht; versetzt man eine Metallröhre, die ein leicht schmelzbares Metall als Kern enthält, an dieser Stelle in rasche Rotation, so schmilzt das Metall; Foucault brachte mittels Kurbel und Räderwerk eine Kupferscheibe zwischen den beiden Polen in rasche Drehung und beobachtete dann eine starke Erhitzung der Scheibe. — Fällt eine Bleikugel auf eine Eisenplatte, so erfahren beide eine Temperaturerhöhung, die man an der Thermosäule messen kann; durch Fallenlassen aus verschiedenen Höhen kann man zeigen, daß die erzeugte Wärme im einfachen Verhältnisse zur Höhe, also im quadratischen zur Geschw. steht, ein Hinweis auf die theoretische Definition der Temp. Aus der Fallhöhe und dem Gewichte läßt sich durch das thermische Aequivalent A von 1^{mk} die entstandene Wärmemenge berechnen; in ähnlicher Weise kann man auffinden, welche Wärmemenge entstände, wenn ein Planet, z. B. die Erde, gegen einen anderen Weltkörper stieße oder in seinem Laufe plötzlich gehemmt würde; so hat Mayer gefunden, daß durch plötzlichen Stillstand der Erde eine zur Verdampfung derselben ausreichende Hitze erzeugt würde, und durch Zusammenstoß mit der Sonne eine solche Hitze, wie durch Verbrennung von 5600 Erdkugeln aus festem Kohlenstoff. — Wie bei Verminderung der Disgregation durch Stoß und Druck Wärme entsteht, so entsteht auch durch jede andere Verminderung der Disgregation d. i. durch größere Annäherung getrennter Theilchen Wärme und umgekehrt durch Vermehrung der Disgregation Kälte; hierher gehören die chemischen Verbindungen, bei denen bekanntlich vorher getrennte Theilchen in enge Berührung kommen, dann die Verwandlung luftförmiger Körper in flüssige oder feste oder von flüssigen in feste, Erscheinungen, die später speciell betrachtet werden. — Zur Wärme durch Arbeit gehört auch die Wärme des elektrischen Funkens und des elektrischen Stromes, da die Elektricität durch Ueberwindung des Leitungswiderstandes geschwächt und die verschwundene Kraft in Wärme umgesetzt wird.

390 **2. Die Sonnenwärme** (Pouillet 1838, Helmholtz 1844). Die Hauptwärmequelle für die Erde ist die Sonne. Nach Pouillets Messungen mit seinem Pyrheliometer erhält 1^{qcm} der Erdoberfläche jährlich von der Sonne eine Wärmemenge von 1/4 Million Cal., woraus sich die jährliche Strahlung der Sonne überhaupt gleich

3000 Quintillionen Cal. ergibt, eine Wärmemenge, welche ausreichend wäre, einen 36m dicken Eishimmel um die Sonne herum, dessen Radius gleich der Erdweite ein könnte, zu schmelzen. Wie diese außerordentliche Wärmemenge entstanden ist und sich erhält, darüber gibt es verschiedene Erklärungen, welche wahrscheinlich alle zutreffend sind. Nach Mayer wird die Sonnenwärme durch den Einsturz zahlreicher Meteoriten erhalten, nach Helmholtz ist sie durch die allmälige Zusammenziehung der Sonnenmaterie aus einer Nebelmasse entstanden und erhält sich durch die fortdauernde Zusammenziehung; eine plötzliche Verdichtung des Urnebels auf das jetzige Volumen würde eine Temperatur von 28 Mill. Grad hervorbringen, und eine Zusammenziehung um $^1/_{10000}$ würde ausreichen, um den nöthigen Sonnenwärmevorrath für 2000 Jahre zu erzeugen. Die Annahme, daß die Sonne eine Gluth habe und durch die Gluth dauernd erwärme, reicht nicht aus, weil durch ihre Ausstrahlung die Sonne in 5000 Jahren sich um 3000° abkühlen müßte, selbst wenn sie aus lauter Wasserstoff bestände, der bekanntlich am meisten Wärme bei der Abkühlung ausstrahlt.

Das Pyrheliometer von Pouillet bestand aus einem silbernen, dosenförmigen Gefäße von 1dm Durchmesser und 15mm Höhe, das mit Wasser gefüllt und mit seiner vorderen, berußten Fläche der Sonne zugewendet wurde; die hintere Fläche wurde mit einem Stöpsel geschlossen, durch welchen eine Thermometerröhre ging, deren Kugel sich in dem Wasser befand. Das Thermometer bildete die Achse des Apparates, um die man denselben während der Bestrahlung drehte, damit die Erwärmung des Wassers gleichmäßig geschah. Die Aufstellung war eine solche, daß die Sonnenstrahlen senkrecht auf die berußte Fläche fielen; dies war der Fall, wenn der Schatten des Gefäßes auf eine Scheibe von demselben Durchmesser fiel, die weit hinten genau parallel zur berußten Fläche auf der Drehachse festsaß. Aus dem Steigen des Thermometers nach einer gewissen Zeit konnte man die dem Wasser mitgetheilte Wärmemenge berechnen. Dieselbe bedurfte einer Correctur, weil der Ruß nicht absolut frei von Reflexion ist, und weil die Luft einen Theil der Sonnenwärme absorbirt.

3. **Wärme durch Verbrennung** (Lavoisier 1781, Tyndall 1863). Die bedeutendste irdische Wärmequelle ist die Verbrennung, d. i. die chemische Vereinigung mit Sauerstoff. Bei jeder chemischen Vereinigung findet eine Annäherung vorher getrennter Atome oder Moleküle statt, es tritt eine Verminderung der Disgregation und daher eine Wärmeerzeugung ein: die chemische Vereinigung ist in der Regel mit Entstehung von Wärme begleitet. Dieser Vorgang ist offenbar eine Verwandlung von Spannkraft oder consumirter Arbeit in die lebendige Kraft der Wärme. 391

Denn denkt man sich die noch getrennten Körper wirklich verbunden, so müßte, um sie wieder in den getrennten Zustand zurück zu führen, um also die sich einander anziehenden Atome und Mol. aus einander zu bringen, auf dem ganzen Trennungswege die Anziehung derselben gegen einander überwunden, d. i. eine Arbeit geleistet werden. Diese bei der Zersetzung nöthige Arbeit ist in Form von Spannkraft, die wir chemische Verwandtschaft nennen, in den getrennten Körpern vorhanden; dieselbe verwandelt sich, wie jede Spannkraft, wenn sie ausgelöst wird, in leb. Kft., hier in Wärme. Das Hinderniß der Spannkraft, welches z. B. in einem gehobenen Gewichte in der Unterstützung desselben liegt, ist bei der chemischen Vereinigung der Zusammenhang jedes Bestandtheiles in sich; damit die Atome oder Mol. ihrer Spannkraft folgen können, müssen sie in jedem Bestandtheile in freien Zustand versetzt und in die Nähe der Atome oder Mol. des anderen gebracht, die Bestandtheile müssen zerkleinert, gemengt und meist, um die Atome und Mol. frei zu machen, erhitzt werden. Ist dies geschehen, so kann die Spannkraft zur Wirkung kommen, die Atome oder Mol. zusammentreiben und sich so in leb. Kft. derselben, d. i. in Wärme verwandeln. Wäre die Spannkraft bekannt, die in den sich verbindenden Körpern vor der Verbindung vorhanden ist, und könnte man die Spannkraft bestimmen, die nach der Verbindung in dem zusammengesetzten Körper noch enthalten ist, so müßte die Spannkraftsdifferenz, in Wärmemaß ausgedrückt, also mit $^1/_{424}$ multiplicirt, die entstehende Wärme angeben. Nun hängt aber diese Spannkraftsdifferenz ab von der Stärke der Anz. und Entf. der Atome innerhalb der Mol. vor und nach der Verbindung, von der Verdichtung oder Verdünnung, die bei der Verbindung stattfindet, von dem Aggregatzustande vor und nach der Verbindung, von innerer und äußerer Arbeit, die während der Vereinigung producirt oder consumirt wird, also von vielen der Berechnung unzugänglichen Umständen. Hieraus folgt die Unmöglichkeit, die auftretende Wärme theoretisch zu berechnen; man hat daher die Verbrennungs-, Ver-

bindungs-, Lösungs-, Zersetzungs- u. a. Wärme durch Versuche bestimmt; so entsteht nach Favre und Silbermann bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff der Wärmebetrag von 34462°, von 1 kg Kohlenstoff 8000°, zwei besonders wichtige Beträge, da alle gewöhnlichen Brennmaterialien aus jenen zwei Elementen bestehen.

Die Existenz der Spannkraft in den verbindungsfähigen Körpern ist theils durch die chemische Verwandtschaft, theils durch den Arbeitsverbrauch bei der Zersetzung bewiesen. Um die sich anziehenden Mol. oder Atome von einander zu trennen, um also die Arbeit der Zersetzung zu leisten, muß eine leb. Kft. zugeführt werden, und zwar, da es sich um eine Wirkung auf kleinste Theilchen handelt, eine leb. Kft., die in Bewegung kleinster Theilchen besteht, also Wärme; durch Zersetzung wird also Wärme oder Arbeit verbraucht. So ist zur Zersetzung von 9 kg Wasser eine Wärme von 34462° oder eine Arbeit von 34462 . 424 = ca 15 Millionen mk nöthig; folglich sind in 1 kg H gegen 8 kg O ca 15 Mill. mk Spannkraft vorhanden. Wie sich diese Spannkraft nun bei der Verbindung in die leb. Kft. der Wärme verwandelt, kann nicht allgemein angegeben werden, da die Vorgänge sehr verschieden und verwickelt sind. Bestände die chemische Verbindung nur in einem Zusammentreten vorher isolirter Atome, so wäre die Erklärung wohl einfach folgende: die einander anziehenden Atome stürzen bei abnehmender Entf. mit zunehmender Geschw. gegen einander, treffen sich endlich, prallen aus einander, werden aber von neu zuströmenden Atomen wieder zusammen gestoßen und gerathen auf diese Weise in Schw., d. i. in höhere Temp., oder sie fliegen als Gasmol. vereinigt in geradliniger Bewegung aus der zusammenwirkenden Stoffmasse mit vermehrter Geschw., d. i. mit erhöhter Temp., hinaus. So einfach ist jedoch der Vorgang der chemischen Verbindung nicht, da selbst die Elemente nicht aus isolirten Atomen, sondern aus Mol. bestehen; bei der Verbrennung des C mögen z. B. die O-Mol. auf ein Stück Kohle losstürzen, dort ein durch die Entzündungstemp. frei gemachtes Kohlenstoffatom zu CO^2 aufnehmen und als Kohlendioxydmoleküle abprallen; dabei mag ein Theil ihrer leb. Kft. auf dem Kohlenstück zurückbleiben, dessen Gluth erhöhen und so die Entzündungstemp. zur weiteren Verbrennung erzeugen. Da hier durch die erzeugte Wärme die weitere Verbrennung ermöglicht wird, wie in allen ähnlichen Fällen, so ist leicht ersichtlich, daß auch hier nach Beseitigung des Hindernisses die Spannkraft sich unaufhaltsam von selbst in leb. Kft. verwandelt, während die umgekehrte Verwandlung, also die chemische Zersetzung, wie in allen Fällen, nicht von selbst, sondern nur bei Uebergang von Wärme zu einem kälteren Körper geschieht. Wie weit in diesem Falle die Disgregationsverminderung geht, ist dem C gegenüber nicht, dem O gegenüber leicht ersichtlich, da das CO^2 leicht coërcibel, O aber permanent ist. Bei der Verbrennung von H muß jedenfalls das O-Mol. gespalten, also innere Arbeit geleistet, producirt werden, wodurch offenbar ein gewisser Wärmebetrag verzehrt wird. Trotz dieses Wärmeverbrauchs entsteht hier die bedeutende Wärme von 34000°; zur Erklärung derselben reicht nicht die Verdichtung der 3 Volumina Knallgas auf 2 Vol. Wasserdampf und die noch weitergehende Verdichtung zu Wasser aus; es muß noch vorausgesetzt werden, was auch aus der Beständigkeit des Mol. H^2O und der zu seiner Zersetzung nöthigen großen Arbeit folgt, daß H^2 und O sich sehr stark anziehen, mit großer Kraft auf einander stürzen und daher eine große Geschw. bewirken. Wo diese Ursache nicht mitwirkt, kann jene innere Arbeit zur Spaltung der O-Mol. sogar die Wärme überwiegen, welche die nachher erfolgende schwächliche Vereinigung erzeugt; dies ist der Fall bei der Entstehung von Stickstoffoxyd; der N hält den O mit geringerer Kraft fest als die O-Atome innerhalb des O-Mol. einander anziehen; die für die Spaltung des O-Mol. verzehrte Wärme überwiegt weit die durch Vereinigung mit dem N entstehende Wärme, so daß trotz der Verdichtung bei der Bildung des NO Wärme verzehrt wird; einfach erklären sich hieraus die beobachteten Thatsachen, daß bei der Zersetzung von NO Wärme entsteht, und daß bei der Verbrennung von C in NO mehr Wärme erzeugt wird als bei der Verbrennung in O. Aehnlich verhalten sich Cyan, Wasserstoffsuperoxyd und Jodwasserstoff.

Die Verbrennungswärme von H und C, sowie von anderen Stoffen, wurde schon von dem Vater der Verbrennungslehre, Lavoisier, aber nicht genau aufgefunden; derselbe benutzte ein mit Eis umgebenes Calorimeter und bestimmte die erzeugte Wärmemenge aus der Menge des geschmolzenen Eises; Dulong benutzte ein Wassercalorimeter. Von Favre und Silbermann wurden die Verbrennungen in einem Gefäße von vergoldetem Kupferblech vorgenommen, in welches drei Röhren gingen, eine für die Zuführung des O, eine für die Ableitung der gasförmigen Verbrennungsproducte und eine weitere mit Glasdeckel und Spiegel zur Beobachtung von außen. Dieses Gefäß stand in dem mit Thermometern versehenen Wassercalorimeter von Silberblech, dieses in einem mit Schwanenpelz gefüllten Gefäße, der auch den Deckel füllte, und dieses abermals in einem Wassergefäße, um äußere Wärme von dem Calorimeter abzuhalten. Nach solchen und ähnlichen genauen Methoden wurden nicht blos die Verbrennungswärmen der brennbaren Stoffe, sondern auch die Vereinigungswärmen der Elemente und von zahlreichen chemischen Verbindungen aufgesucht; so ergab sich z. B. die Entstehung großer Wärmemengen bei den Salzbildungen durch Säuren und Basen

In letzter Zeit werden die Wärmeverhältnisse bei den chemischen Processen und Lösungen vielseitig untersucht, weil man hierdurch der Energie der Stoffe näher zu kommen hofft; besonders ausgedehnte Untersuchungen hat der dänische Physiker J. Thomsen von 1853 bis in die letzte Zeit angestellt und eine große Anzahl von Gesetzen der „Thermochemie" gefunden, die den Grundsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechen; auch der französ. Physiker Berthelot hat zahlreiche thermochemische Forschungen durchgeführt; doch können wir auf diesen chemischen Zweig der mechanischen Wärmetheorie hier nicht näher eingehen.

Aus der Verbrennungswärme und der specifischen Wärme des Verbrennungsproductes läßt sich die **Temperatur einer Verbrennung**, einer Flamme berechnen. So entsteht nach Favre und Silbermann durch Verbrennung von 1 kg H, d. i. durch Vereinigung mit 8 kg O zu 9 kg Wasserdampf, eine Wärme von 34462 c; 1 kg Wasserdampf entwickelt daher 3829 c. Da nun die specifische Wärme des Wasserdampfes, was später erhellen wird, = 0,475 ist, da also 0,475 c im Stande sind, 1 kg Wasserdampf um 1° zu erwärmen, so ertheilen die 3829 c dem Wasserdampf eine Temperatur von $3829/0{,}475 = 8000°$. Obwohl man immer an der Höhe dieser berechneten Temp. der Knallgasflamme zweifelte, so brachte doch erst Devilles Entdeckung der Dissociation (1863) vollständige Sicherheit; hiernach wird Wasser bei einer Temp. von 3000° vollständig zersetzt; folglich können sich seine Bestandtheile bei dieser oder einer höheren Temp. unmöglich mit einander verbinden; sie können es auch bei einer etwas niedrigeren Temp. nicht vollständig, weil Wasserdampf bei dieser Temp. im Zustande partieller Zersetzung, im Zustande der Dissociation ist. Bunsen zeigte nun auch durch Versuche (1867) und darauf gestützte Rechnungen, daß reines Knallgas in der That schon bei 2844°, Knallgas mit atmosphärischer Luft gebildet bei 2024° verbrenne, reines Kohlenoxydknallgas bei 3033°, mit Luft bei 1997°, daß aber bei dieser Verbrennung nur 1/3 des Gases wirklich verbrenne, die übrigen 2/3 aber durch die hohen Temp. die Vereinigungsfähigkeit verloren haben; so bestehen z. B. die Verbrennungsproducte von reinem Knallgas aus 1 Vol. O, 2 Vol. H und 1 Vol. H_2O.

4. Die Lebenswärme. In allen Organen des menschlichen und des thierischen Körpers, mit Ausnahme der Horngebilde, finden fortwährend Oxydationsprozesse statt, d. i. Disgregationsverminderungen, durch welche bekanntlich Wärme oder Arbeit entsteht; der nöthige Sauerstoff gelangt durch die Lungen in das Blut und so in alle Körpertheile, die oxydirbaren Stoffe, hauptsächlich Kohlenwasserstoffe gelangen durch die Verdauung in das Blut und so ebenfalls an alle Körpertheile, während die Oxydationsproducte, Kohlendioxyd und Wasserdampf durch Haut, Lunge u. s. w. entfernt werden. Oxydationen im Muskel erzeugen Bewegungen der Moleküle, die sich in Contraction der Muskelfaser verwandeln, alle übrigen Oxydationen erzeugen direct Wärme. Im ruhenden Körper werden sämmtliche Leistungen, selbst die unwillkürlichen Bewegungen in Wärme verwandelt; im arbeitenden Körper überträgt sich die lebhaftere Oxydation der arbeitenden Theile auch auf die übrigen; außerdem wird ein großer Theil der Muskelarbeit in Wärme verwandelt, durch Reibung des Muskels in seinen Hüllen, der Sehnen in ihren Scheiden, der Knochen in ihren Gelenkpfannen; daher ist die vom arbeitenden Körper producirte Wärmemenge größer als die des ruhenden. Das Blut vertheilt die Wärme gleichmäßig durch den Körper, der hierdurch im normalen Zustande eine Temperatur von 37,5° hat; dieselbe Temperatur hat auch der Körper der Säugethiere, eine etwas höhere besitzen die Vögel. Beim Menschen steigert sie sich in Fieberzuständen bis auf 42—44° und sinkt in Cholerafällen oder in der Todesnähe tiefstens bis auf 35°; bei 42° soll schon das Blut gerinnen, bei 49° tritt Wärmestarre der Muskeln ein. Nach dem Tode hat die allgemeine Muskelzusammenziehung der Todesstarre eine vorübergehende Temperatur-Erhöhung zur Folge. 392

Früher schied man (nach Liebig) den Vorgang der Krafterzeugung von dem der Wärmebildung; die letztere hielt man für Folge der Oxydation der Kohlenwasserstoffe des Fettes, die erstere für eine Folge von chemischen Thätigkeiten der stickstoffhaltigen Muskelsubstanz. Seitdem aber gefunden wurde, daß durch Thätigkeit keine vermehrte Ausscheidung von Harnstoff, des chemischen Productes der stickstoffhaltigen Körpersubstanzen, entsteht (Voit), daß aber der thätige Muskel, ausgeschnitten, künstlich von Blut durchströmt, wie auch im Organismus, mehr Kohlendioxyd entwickelt als der ruhende (Ludwig), daß der ganze Organismus zur Zeit der Arbeit mehr Kohlendioxyd ausscheidet als während der Ruhe (Reg-

nault und Reiset), daß der Muskel im Organismus wie auch ausgeschnitten im Zustande der Thätigkeit mehr Sauerstoff verzehrt als im Ruhestande, wie aus dem sauerstoffärmer abfließenden Venenblute ersichtlich ist (Ludwig), sowie daß endlich der ganze Organismus bei der Arbeit mehr Sauerstoff als in der Ruhe verbraucht, — seitdem schreibt man die Kraftbildung ebenfalls der Oxydation der Kohlenwasserstoffe zu. Hiermit fällt auch Liebigs Scheidung der Nahrungsmittel in Respirations- und plastische Mittel und gewinnen die stickstoffarmen Nahrungsmittel (Bier, Reis, Kartoffeln) ihren im Leben immer behaupteten Werth auch in der Wissenschaft wieder.

Es ist leicht ersichtlich, daß auch die drei letzten Wärmequellen ihren Grund in Verwandlung von Arbeit in Wärme haben. Umgekehrt wird sich zeigen, daß die meisten Wirkungen der Wärme Verwandlungen der Wärme in Arbeit sind. Durch vermehrte Wärmezufuhr wird nämlich die leb. Kft. der Mol. und ihrer Bestandtheile vergrößert, demgemäß werden die Mol. und ihre Atome weiter von einander entfernt, die Hauptwirkung der Wärme ist Vergrößerung der Disgregation. Hierdurch wird das Volumen der Körper vergrößert: die Ausdehnung; feste Körper werden in flüssige, flüssige in luftförmige verwandelt: Schmelzung und Verdampfung; die Bestandtheile der Mol. werden von einander getrennt: chemische Zersetzung. Die meisten Wärme-Erscheinungen sind also Verwandlungen von Wärme in Arbeit und Verwandlungen von Arbeit in Wärme. Der Satz von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit ist daher ein Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.

393 **Die zwei Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie** (Mayer 1843, Clausius 1850—1865). 1. Die Aequivalenz von Wärme und Arbeit: Wenn Arbeit als solche verschwindet, so entsteht Wärme und zwar für 1^{mk} $^1/_{424}{}^c$; wenn Wärme in Arbeit verwandelt wird, so entstehen für 1^c 424^{mk}. Drückt man die Arbeit ebenfalls nach Wärmemaß aus, indem man sie mit $A = {}^1/_{424}{}^c$ multiplicirt, so nennt man das Product Werk. Weil bei der Entstehung von Wärme Werk verbraucht wird, und weil Entstehung und Verbrauch entgegengesetzt sind, so muß man den Verbrauch von Werk als negativ auffassen, wenn man die Entstehung von Wärme als positiv bezeichnen will; und da nach dem 1. Hauptsatze bei einem und demselben Processe das verbrauchte Werk der entstandenen Wärme gleich ist, so kann man diesen Satz auch so aussprechen: die algebraische Summe von Wärme und Werk ist in jedem Processe gleich Null.

Wir haben den ersten Hauptsatz (s. 387. 3.) der Vollständigkeit wegen hier noch einmal angeführt; derselbe folgt einfach aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft oder besser gesagt der Energie, dessen allgemeine Form nach Clausius „die Energie des Weltalls ist constant" ebenfalls schon früher angegeben wurde (35.). Experimentell nachgewiesen ist der erste Hauptsatz durch die zahlreichen Versuche von Mayer, Joule, Hirn u. A. — Mathematisch ausgedrückt ist derselbe durch die Gleichung $Q = U + A.W$, worin Q die einem Körper zugeführte Wärmemenge, U die Zunahme der Energie in Wärmemaß ausgedrückt und W die äußere Arbeit derselben bedeutet.

2. Die Aequivalenz der Verwandlungen: Die algebraische Summe der Verwandlungen ist bei umkehrbaren Processen gleich Null, bei nicht umkehrbaren positiv. — Außer den Verwandlungen von Werk in Wärme und von Wärme in Werk, kann man, wenn unter Werk hier vorwiegend der Wärmewerth äußerer Arbeit verstanden wird, noch folgende Verwandlungen anführen, die als Wärmewirkungen zu bezeichnen sind: Disgregationsvermehrung und Disgregationsverminderung, Erhöhung der Temperatur oder Verwandlung von niederer Wärme in höhere und Erniedrigung der Temperatur oder Verwandlung von höherer Wärme in niedere, Uebergang von Wärme aus einem wärmeren in einen kälteren Körper, und umgekehrt, Uebergang von Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper. Bezeichnen wir immer die erste der zwei entgegengesetzten Verwandlungen als positiv, so müssen wir die zweite als negativ auffassen. Umkehrbare Processe sind solche bei denen alle Verwandlungen in der Weise stattfinden, daß die umgekehrten Verwandlungen unter denselben Umständen geschehen.

Der Beweis des Satzes kann hier blos an Beispielen stattfinden. Nehmen wir den einfachsten Fall, daß ein vollkommenes Gas sich ausdehnt, so sind damit 2 Verwandlungen vollbracht, Vermehrung der Disgregation (pos.), Verwandlung von Wärme in Werk (neg.). Diese beiden Verwandlungen sind einander gleich und entgegengesetzt, ihre alg. Summe ist

aher = Null; es handelt sich nur darum, Werthe für diese Verwandlungen aufzufinden. für die in Werk verwandelte Wärme dürfen wir als Verwandlungswerth nicht gerade die Nenge der Wärme setzen; denn das Werk besteht hier nur in Ueberwindung des äußeren Druckes, da bei der Ausdehnung eines vollkommenen Gases keine Anziehg. zu überwinden ist. findet aber dieselbe Disgregationsvermehrung bei höherer Temp. statt, so muß wegen des öheren Druckes mehr Wärme in Werk verwandelt werden. Es entspricht also derselben Disgregationsvermehrung in zwei verschiedenen Fällen eine verschiedene in Werk verwandelte Wärmemenge; der Verwandlungswerth dieser zwei Wärmemengen muß jedoch derselbe sein, a er dem Verwandlungswerthe einer und derselben Disgregationsvermehrung äquivalent st. Bei höherer Temp. ist der Druck deßhalb größer, weil die leb. Kft. der einzelnen Gasnol., d. i. die absolute Temp. größer ist; um bei dieser höheren Temp. die Disgregation m gleichviel zu vermehren, muß offenbar eine Wärmemenge, eine leb. Kft. zugeführt werden, ie zu der leb. Kft. der Mol. in demselben Verhältnisse steht wie bei der niederen; es ist aher der Aequivalenzwerth der in Werk verwandelten Wärmemenge gleich dieser Wärme ividirt durch die absolute Temp. $= Q/T$. Drücken wir auch die an Zeichen entgegengesetzte Disgregationsvermehrung in gleicher Weise aus, so ist die Summe dieser beiden gleichen lequivalenzwerthe der Verwandlungen = Null. Der mathematische Ausdruck des zweiten Satzes für umkehrbare Processe ist daher $\Sigma(Q/T) = 0$. Dasselbe würde sich für jeden Proceß rgeben, der aus mehr als 2 umkehrbaren Veränderungen besteht.

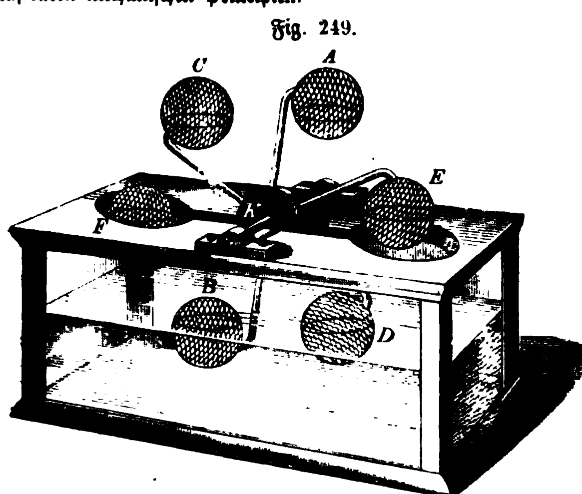
Uebrigens sind sehr viele Processe nicht umkehrbar. Ein vollkommenes Gas kann sich usdehnen, ohne Arbeit zu vollbringen, kann sich aber nicht wieder zusammenziehen, ohne aß es Arbeit verbraucht. Es geschieht also hier eine Disgregationsvermehrung (pos.) ohne ine gleich große entgegengesetzte, compensirende Verwandlung, die Disgregationsverminderung neg.) geschieht dagegen nur durch eine äquivalente Verwandlung von Arbeit in Wärme pos.). — Ebenso geschieht z. B. bei der Reibung die Verwandlung von Arbeit in Wärme pos.), ohne daß eine gleiche compensirende andere Verwandlung mit einhergeht, während ine Verwandlung von Wärme in Arbeit (neg.) z. B. in der Dampfmaschine nicht stattindet, ohne daß dabei eine äquivalente pos. Verwandlung geschieht, ein Uebergang von Wärme aus dem Dampfkessel in den Condensator oder in die Luft. — Wärme kann aus inem wärmeren Körper ohne Weiteres durch Leitung oder Strahlung in einen kälteren lbergehen (pos.), während der neg. Uebergang aus einem kälteren Körper in einen wärmeren ur möglich ist, wenn in jenem zuerst Wärme aus Werk entsteht (pos.) und diese dann übergeführt wird. Die Verwandlung der Spannkraft der chemisch sich verbindenden Stoffe in ie leb. Kft. der Wärme geschieht von selbst, die umgekehrte Verwandlung aber nur bei inem gleichzeitigen Wärmeübergang. So finden wir, daß die neg. Verwandlungen immer urch äquivalente pos. compensirt werden, die pos. aber nicht, woraus sich ergibt, daß die Summe der Verwandlungen in einem nicht umkehrbaren Processe pos. ist; der math. Ausdruck des zweiten Satzes für nicht umkehrbare Processe ist demnach $\Sigma(Q/T) > 0$.

Wird der zweite Grundsatz auf das Weltall angewendet, so ergibt sich, daß ie Summe der positiven Verwandlungen immer größer wird und ein Maximum rreichen muß, nach welchem keine Verwandlungen mehr möglich sind; Clausius ennnt die Summe aller Verwandlungen die Entropie und gibt dem letzten Geanken eine der allgemeinen Form des ersten Satzes entsprechende Gestalt, indem r den zweiten Satz so ausspricht: *Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.*

Dieses Maximum besteht in der Zerstreuung aller Energie in den Aether des Welt- aumes. Thomson folgerte den Gedanken der *Dissipation der Energie* (1852) aus er ersten Fassung des zweiten Hauptsatzes durch Clausius (1850). Rankine, der ebenfalls inen Beweis für den zweiten Hauptsatz, jedoch aus der molekularen Bewegung der Wärme ufgestellt hatte, sprach (1852) den Gedanken aus, daß die zerstreute Energie an den Grenzen es Weltäthers reflectirt und in gewissen Brennpunkten concentrirt werde; durch diese *Reconcentration der Energie* könnten erstarrte Weltkörper zu erneuter Sonnengluth rhitzt werden. Ein specieller Fall des zweiten Satzes, daß nämlich Wärme nicht von selbst n Arbeit übergehe, wurde schon von Sadi Carnot (1824) erkannt und durch die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile bewiesen; wie Wasser nur durch ein Gefälle Arbeit leiste, so önne auch die Wärme nur dann Arbeit hervorbringen, wenn sie von einer höheren zu einer iederen Temp. herabfalle. Obwohl hiernach die Meinung berechtigt ist, Carnot habe die Wärme noch als Stoff betrachtet, so sollen nach Mittheilungen seines Bruders an die franz. Akademie (1878) alte Manuscripte die Ansicht aussprechen, die Wärme sei Bewegung, könne lso in bewegende Kraft übergehen und aus dieser entstehen und zwar in dem constanten Verhältnisse $1^{\circ} = 370^{mk}$, eine noch ältere Bestimmung als die von R. Mayer. Fruchtbar wurde der Gedanke Carnots erst, als Clausius (1850) seine allgemeine Bedeutung erkannte,

ihn als zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie aussprach und mathematisch darstellte. Der erste Beweis von Clausius beruht auf dem Grundsatze: Wärme kann nicht von selbst aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen. Da die oben erwähnte Folgerung über die Reconcentration diesem Grundsatze zu widersprechen scheint, so hat Clausius (1871) einen auf allgemeine mechanische Principien gegründeten zweiten Beweis gegeben. Er bewies (1870) den Satz $\Sigma \frac{1}{2} mv^2 = - \frac{1}{2} \Sigma (Xx + Yy + Zz)$; die linke Seite ist die leb. Kft. eines in stationärer Bewegung begriffenen Massensystems, die rechte enthält die Summe der Producte der Kraftcomponenten X, Y u. Z mit den Coordinaten x, y u. z, ist also der Arbeit verwandt; wie schon früher die in Spannkraft verwandelte Arbeit Ergal genannt wurde, so führt Clausius für jene neg. halbe Productensumme den Namen Virial ein, weil sie bei gleichbleibenden Coordinaten den Kräften (vis, Kraft) proportional ist; der Satz heißt daher mit Worten: die mittlere lebendige Kraft eines Systems ist gleich seinem Virial. Durch Anwendung auf die Wärme folgt, daß die wirksame Kraft der Wärme der absoluten Temp. proportional ist, und aus diesem Satze hatte Clausius schon (1862) den zweiten Hauptsatz abgeleitet. Auch Boltzmann stellte einen Beweis desselben aus allgemeinen mechanischen Grundsätzen her, und Szily leitete ihn (1872) aus dem Hamilton'schen Princip (1834) ab, das aus d'Alemberts Princip (1742) analytisch gewonnen wird; so ruht der zweite Hauptsatz sicher auf unantastbaren mechanischen Principien.

Fig. 249.



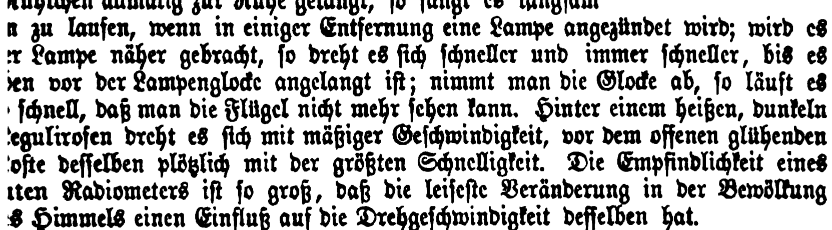
Wie Wärme sich nur in Arbeit verwandelt, wenn ein Uebergang der Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper stattfindet, so kann der Uebergang der Wärme von der Umgebung eines kälteren Körpers auf diesen zur Erzeugung von Arbeit dienen. Dies geschieht in der thermometrischen Schaukel und dem thermometrischen Rad von Bernardi (1874) (Fig. 249). Die Schaukel besteht aus einer an beiden Enden nach unten senkrecht umgebogenen Glasröhre, die mit Glaskugeln endigt, luftleer und zu drei Viertel ihres Raumes mit Aether gefüllt ist. Diese Röhre wird zu einer Schaukel dadurch, daß sie um eine Achse, die an der Mitte der Röhre in dem Deckel eines wassergefüllten Kastens wagrecht angebracht ist, sich drehen kann. Taucht die eine der beiden verschleierten Kugeln in das Wasser, so befindet sich die andere in der Luft, das Wasser ihres Schleiers verdunstet, ihr Aether condensirt sich durch die entstehende Verdunstungskälte, der Aether in der anderen Kugel aber verdampft durch die Wärme, die fortwährend aus der wärmeren Umgebung in das Wasser übergeht. Der Aetherdampf steigt fortwährend in die hervorragende Kugel, condensirt sich immer und sammelt sich bald dort in solcher Menge, daß diese Kugel in das Wasser sinkt und die andere sich hebt, worauf das ganze Spiel sich in umgekehrter Weise wiederholt; hierdurch entsteht eine schaukelnde Bewegung. Durch Verbindung von 3 solcher Röhren, deren [illegible] nach entgegengesetzten Richtungen abgebogen sind, zu einem Rade (Fig. 249) erhielt Bernardi eine continuirliche drehende Bewegung, welche eine Uhr treibt.

In den angeführten Beispielen für die Leistung von Arbeit durch Wärme findet der hiermit nothwendig verbundene Uebergang der Wärme von einem wärmeren zu [illegible] kälteren Körper in Gestalt von Körperwärme statt, in der Dampfmaschine durch [illegible] Verbindung des Dampfes mit dem Kessel einerseits und dem Condensator andererseits, [illegible] Bernardis Rad und Schaukel durch die Berührung der wärmeren Luft mit dem Wasser. Der Uebergang kann jedoch auch durch Strahlung stattfinden; so leistet [illegible] Sonne alle Erdenarbeit, obwohl ihre Wärme als Aetherwellenbewegung durch den Weltraum auf die Erde gestrahlt worden ist. Hierbei wird indeß die leb. Kft. der [illegible] wellen meist erst in Spannkraft z. B. in die des Kohlenstoffs oder die des gehobenen [illegible]

verwandelt. Eine anscheinend directe Umwandlung von Strahlen in Arbeit geschieht jedoch in dem Radiometer.

393a Das **Radiometer** oder die **Lichtmühle** (Crookes 1874) besteht in seiner gewöhnlichsten Form (Fig. 250) aus einem Kreuze von Platindraht, dessen 4 Arme an ihren Enden verticale Blättchen z. B. aus geglühtem Glimmer tragen, welche auf der einen Seite durch einen Ueberzug von Ruß stark absorbirend gemacht sind, während die anderen blank gelassen wurden; und zwar sind alle berußten Seiten nach der einen Drehrichtung, alle blanken nach der entgegengesetzten Seite gewendet. Das Rädchen ist in einen Glasballon von 5—6^{cm} Durchmesser eingeschlossen, der durch Anwendung von verbesserten Quecksilberluftpumpen auf den höchsten Grad der Verdünnung der Luft (oder eines anderen Gases) gebracht ist; derselbe geht oben und unten in röhrenförmige Verlängerungen über, aus denen zwei enge genau übereinander stehende Glasröhren ab und cd ragen; die untere ab trägt eine Nadelspitze, auf welcher das Drehkreuz mittels eines Glashütchens schwebt, wodurch die Drehbarkeit hergestellt ist, während das Herabfallen durch die obere Glasröhre cd unmöglich gemacht wird, da ihre untere Mündung d das Glashütchen lose umfaßt.

Fig. 250.



Setzt man das Radiometer den Strahlen irgend einer Licht- oder Wärmequelle aus, so dreht sich das Rädchen, und zwar mit den blanken Flächen voran, so als ob auf die dunkeln Flächen ein Druck oder Stöße ausgeübt würden; auch eine dunkele Wärmequelle z. B. ein warmer Ofen bringt diese Drehung hervor. Die Geschwindigkeit der Drehung steigt mit der Stärke der Strahlung. Ist z. B. bei hereingebrochenem Abenddunkel in einem Zimmer das Rühlchen allmälig zur Ruhe gelangt, so fängt es langsam an zu laufen, wenn in einiger Entfernung eine Lampe angezündet wird; wird die Lampe näher gebracht, so dreht es sich schneller und immer schneller, bis es eben vor der Lampenglocke angelangt ist; nimmt man die Glocke ab, so läuft es so schnell, daß man die Flügel nicht mehr sehen kann. Hinter einem heißen, dunkeln Regulirofen dreht es sich mit mäßiger Geschwindigkeit, vor dem offenen glühenden Roste desselben plötzlich mit der größten Schnelligkeit. Die Empfindlichkeit eines guten Radiometers ist so groß, daß die leiseste Veränderung in der Bewölkung des Himmels einen Einfluß auf die Drehgeschwindigkeit desselben hat.

Von den zahlreichen Radiometerversuchen mögen noch einige erwähnt werden, die zur Erklärung seiner Erscheinungen nach der mech. Gastheorie geführt haben. Die Drehrichtung mit den blanken Flächen voran nennt man pos. die entgegengesetzte neg. Taucht man ein Radiometer, das bei gewöhnlicher Temp. stille steht, in kaltes Wasser, so dreht es sich neg., und zwar so lange, bis die Temp. constant geworden ist; nach dem Herausnehmen aber dreht sich die Mühle selbst in der tiefsten Dunkelheit wieder pos. — Gießt man Aether auf ein in pos. Drehung befindliches Radiometer, so dreht es sich neg., nimmt aber bald wieder die pos. Richtung an, selbst wenn man nochmals Aether aufträufelt. Hieraus könnte man nun vermuthen, daß die Glashülle des Radiometers bei seinen Bewegungen mitwirkt. Es giebt aber eine Reihe von Versuchen, welche entschieden beweisen, daß die Bewegungen nicht unmittelbar durch eine äußere Kraft, wie etwa Stöße der Aetherwellen, hervorgebracht werden, und auch nicht durch eine ausschließlich innere Kraft des Rädchens, wie etwa Elektricität oder von diesem entwickelte Gasströme, sondern daß die Bewegungen herrühren von einer Wechselaction zwischen dem Rädchen und der Glashülle, welche Gegenwirkung durch die geringe Menge des verdünnten Gases, des Gasresiduums, vermittelt wird. Schuster (1876) hing das Radiometer bifilar (d. i. an zwei Fäden) in einem größeren Glasgefäße auf, das er darauf mit der Luftpumpe entleerte. Als nun das Licht einer Knallgaslampe auf das Radiometer fiel, drehte sich das Rädchen pos. während die Glashülle in neg. Richtung abwich,

und bei Abstellung des Lichtes sich positiv drehte. Crookes stellte (1876) einen ähnlichen Versuch mit einer 10armigen Lichtmühle an, in welcher zwei Arme einen langen Magnet bildeten; er setzte den ganzen Apparat in ein Wassergefäß, in welchem nach kräftiger Bestrahlung das Rädchen schnell, die Glashülle aber langsam rotirte, jedoch beide in pos. Richtung. Als nun ein kräftiger Magnet in die Nähe gebracht wurde, stand das Rädchen plötzlich still, die Glashülle aber drehte sich rasch in neg. Richtung, und zwar so lange, als die Kerzen brannten. Cooke beleuchtete (1877) ein Radiometer mittels Knallgaslicht in dreifacher Weise; zuerst so, daß nur die berußten Flächen getroffen wurden; dann traf das Licht nur die blanken Flächen und im dritten Falle beiderlei Flächen. In derselben Zeit nun, wo das Rädchen im ersten Falle 232 Rotationen ausführte, vollbrachte es im zweiten [illegible] und im dritten 319 Umdrehungen. Wäre die Wirkung einer äußeren Kraft zu verdanken, so müßte im dritten Falle die Wirkung gleich der Differenz der zwei ersten Wirkungen gewesen sein. Es kann demnach die Wirkung nur von einer Reaction der Theile des Instrumentes selbst herrühren; Cooke nennt das Radiometer eine Wärmemaschine, in welcher bei pos. Drehung die berußten Flügel den Heizer, die Glashülle den Kühler bilden, während bei neg. Drehung das Sachverhältniß sich umkehrt. Dafür spricht auch die von Crookes beobachtete Thatsache, daß bei dem Doppelradiometer die Mühle in dem einen Gefäße doppelt so schnell rotirt als in dem anderen doppelt so weiten Gefäße. Daß die Reaction zwischen den Flügeln und der Hülle durch das Gasresiduum vermittelt wird, ist aus der verschiedenen Wirkung bei verschiedener Verdünnung und bei verschiedenen Gasen von gleicher Verdünnung ersichtlich. Die Bewegung des Mühlchens, d. i. die Abstoßung der berußten Flächen findet erst bei großer Verdünnung der Luft im Radiometer statt. Durch verbesserte Luftpumpen ist man bis zu 1 Zehnmilliontel Atmosphäre der Gasspannung herabgelangt. Bei solch geringen Spannungen nimmt die Abstoßung bei allen Gasen mit fortschreitender Verdünnung bis zu einem gewissen Maximum zu, welches für Luft, Sauerstoff, Wasserstoff bei einem Drucke von resp. 40, 30 und 50 Milliontel Atm. eintritt, wonach die Abstoßung so rasch abnimmt, daß offenbar bei völliger Luftleere keine Wirkung mehr vorhanden sein kann.

Wenn es hiernach feststeht, daß die bewegungerzeugende Reaction zwischen Glas und Flügel durch das Gasresiduum vermittelt wird, so liegt es nahe, diese Wirkung in der molekularen Bewegung der Gase zu vermuthen. Mittels derselben wird die Radiometer-Erscheinung auf folgende Weise erklärt: Da der Ruß die Str. am leichtesten absorbirt, w rden offenbar die berußten Flächen stärker erwärmt als die blanken; auch dringen die die blanken Flächen treffenden Str. wenigstens theilweise durch den Glimmer auf den Ruß; daher müssen die Gasmol., die gegen die berußten Flächen treffen, mit größerer Geschw. umkehren, als die Mol., welche die blanken Flächen berührt haben; jene Mol. werden mit einer größeren leb. Kft. von den berußten Flächen zurückgeworfen, üben also auch auf diese nach dem Gesetze: actio est par reactioni einen stärkeren Rückstoß aus, treiben daher die berußten Flächen fort, wirken so, als ob diese Flächen abgestoßen würden. Diese Erklärung erscheint sehr einfach, macht auch sofort klar, daß im luftleeren Raume gar keine und im äußerst verdünnten Raume nur eine sehr schwache Wirkung stattfinden kann, sowie warum verschiedene Gase einen verschiedenen Einfluß durch ihre molekulare Bewegung haben, läßt aber noch nicht erkennen, warum die Erscheinungen nur in sehr verdünnten Gasen eintreten und inwiefern eine Reaction der Glashülle im Spiele ist. Bedenkt man jedoch, daß nach den Berechnungen der dynamischen Gastheorie selbst in dem kleinen Raume eines Radiometers bei *gewöhnlichem Luftdrucke* zahllose Mol. vorhanden sind, daß also die Wege der einzelnen Mol. bis zu ihren Zusammenstößen unendlich klein sind, so werden auch die zwei letzten Einflüsse erklärlich werden. Die von einer wärmeren berußten Fläche zurückprallenden Mol. halten die langsamer nach der erwärmten Fläche hingehenden theilweise zurück, so daß dieselben hinter die erwärmte Fläche weiter gehen; daher nimmt die Zahl der die Rußflächen treffenden Mol. in dem Maße ab, wie die Stärke der einzelnen Rückstöße durch die höhere Erwärmung zunimmt, der Druck auf die Rußfläche ist ebensogroß als der Druck auf die blanke Fläche; es findet keine Bewegung statt. Ist aber die Verdünnung der Luft sehr bedeutend, so fliegen die zurückprallenden Mol. bis an die Glaswand und geben dieser ihren Ueberschuß an leb. Kft. ab, worin die Mitwirkung der Glaswand und die Möglichkeit und entgegengesetzte Richtung ihrer Bewegung erklärt ist. In diesem Falle werden also von einem zurückprallenden und die Glaswand treffenden Mol. keine vorwärts strebenden Mol. aufgehalten, die berußte Fläche empfängt ebenso viele Stöße und Rückstöße als die blanke; aber jeder Rückstoß auf die berußte Fläche ist stärker und die immerhin noch zahlreichen Mol. können durch die Zusammenwirkung ihrer stärkeren Rückstöße die schwarze Fläche forttreiben, das Mühlchen in positiver Richtung drehen. Diese von Reynolds herrührende Theorie ist 1877 von Schuster veröffentlicht und von Crookes adoptirt worden. Pringsheim erforschte (1883) die Gesetze der Radiometerbewegung und hält die Theorie für harmonirend mit denselben. Daß bei höherem Drucke das Rädchen sich neg. dreht, ist durch die Luftströme zu erklären, die an den wärmeren Rußflächen aufsteigen und auf dieser Seite

den Druck vermindern. Barret erklärte (1881) die Schw. des Trevelyan-Instrumentes durch die radiometrischen Rückstöße der erhitzten Luft.

3. Erste Hauptwirkung der Wärme.

Die Ausdehnung.

Bedingung und Ursache der Ausdehnung. Jede Erhöhung der Temperatur 394 eines Körpers ist mit einer Vergrößerung seines Volumens, mit Ausdehnung verbunden. Dieselbe besteht in einer Vermehrung der Disgregation durch die erhöhte lebendige Kraft der Theilchen, welcher Vermehrung eine äquivalente Verwandlung von Wärme in Arbeit entspricht, in innere Arbeit, wenn eine Anziehung der Theilchen zu überwinden ist, und in äußere Arbeit, wenn ein äußerer Druck zu überwinden ist; gewöhnlich muß innere und äußere Arbeit geleistet werden. Die Vermehrung der Disgregation geschieht auf folgende Weise: die Gasmoleküle üben durch ihre größere lebendige Kraft einen verstärkten Stoß, einen stärkeren Druck auf ihre Umgebung aus, wodurch dieselbe soweit ausweicht, bis durch Verdünnung die erhöhte Stoßkraft der Moleküle ausgeglichen ist; bei den flüssigen und festen Körpern wird die schwingende Bewegung verstärkt, indem zunächst die Amplituden größer werden und die dadurch aufeinander stoßenden Moleküle sich mehr von einander entfernen. Der Satz: Wärme dehnt die Körper aus, hat verschiedene Umkehrungen; die nächstliegende ist der Satz: Abkühlung bewirkt Zusammenziehung, Verkleinerung des Volumens. Dem Geiste der mechanischen Wärmetheorie entsprechen folgende zwei Umkehrungen: Jede Volumenverkleinerung erzeugt Wärme und jede Volumenvergrößerung Abkühlung; denn erstere ist eine Verminderung, letztere eine Vermehrung der Disgregation; bei ersterer verschwindet, bei letzterer entsteht Arbeit; verschwindende Arbeit aber erzeugt Wärme, entstehende Arbeit verbraucht Wärme.

Einfache Versuche zur Ausdehnung sind: Eine metallene Kugel, welche bei gewöhnlicher Temp. noch leicht durch einen Ring fällt, geht nach Erhitzung nicht mehr durch denselben. Bläst man an eine enge Glasröhre eine Kugel an (Dilatometer) und füllt dieselbe mit irgend einer Flüssigkeit, so steigt diese bei Erwärmung der Kugel in der Röhre. Wird eine zugebundene Blase auf einen Ofen gelegt, so schwillt sie bis zur Glätte und bis zum Springen an. Bringt man in die Glasröhre des Dilatometers einen Tropfen Quecksilber, so steigt derselbe schon bei Annäherung der Hand an die Kugel (Differentialthermometer).

1. **Gesetze der Ausdehnung.** Die Luftarten dehnen sich am stärksten 395 aus, für 100° um etwa 1/3, die flüssigen Körper viel weniger, für 100° um etwa 1/5 bis 1/55, die festen am wenigsten, für 100° um 1/60 bis 1/600.

Denn bei der Ausdehnung der Luftarten ist nur der äußere Luftdruck zu überwinden, bei den flüssigen und festen Körpern aber auch die Anziehg. der Mol., welche Anziehung in den festen Körpern wegen geringerer Molekularabstände größer ist als in den flüssigen Körpern. Nun ist aber eine Erhöhung der Temp. um 1° immer eine gleiche Vermehrung der Energie der Mol.; dieser gleiche Energiezuwachs kann den kleinen Luftdruck auf einem großen Wege überwinden, die starke Anz. der Mol. aber nur auf einem kleinen Wege. Leicht ist dieses Gesetz bei den angeführten Versuchen zu ersehen. Weil die festen und flüssigen Körper in einem gewissen Volumen viel mehr Mol. haben, als die luftförmigen Körper, und weil sie sich nur wenig ausdehnen, so ist der Druck, den sie bei der Ausdehnung ausüben, ein sehr großer, fast unüberwindlicher. Auf die in dem Ringe liegende heiße Kugel kann man hämmern, ohne sie durch den Ring zu pressen. Gegen diesen gewaltigen Druck ist der äußere Luftdruck gering; bei der Ausdehnung der festen und flüssigen Körper ist daher hauptsächlich innere Arbeit zu vollbringen.

2. Die Luftarten dehnen sich alle gleich aus und zwar für 100° um etwa 1/3, genauer für jeden Grad um 0,003665 oder 1/273 (Gay-Lussacs Gesetz), die flüssigen und festen Körper verschieden z. B. Oele für 100° c. um 1/12, Wasser um 1/25, Quecksilber um 1/55, Kautschuk und Guttapercha 1/60, Zink und Blei um 1/100, Kupfer und Gold um 1/200, Stahl und Platin um 1/300, Holz und Glas um 1/400, Diamant sogar nur um 1/3000.

Denn alle Luftarten haben bei der Ausdehnung nur denselben äußeren Luftdruck zu überwinden, die anderen Körper aber ihre höchst verschiedenen inneren Anziehungen. Der exp. Nachweis ist leicht aus den angegebenen Versuchen zu führen.

3. **Die Luftarten dehnen sich gleichmäßig aus** d. h. **für jeden Grad um gleich viel**; ihre Ausdehnung ist der Temperatur-Erhöhung proportional; **die festen und flüssigen Körper dagegen dehnen sich nicht ganz gleichmäßig aus**; die Ungleichmäßigkeit ist um so größer, je näher die Körper einer Aggregatzustandänderung sind. Man unterscheidet bei den festen Körpern die Vergrößerung des ganzen Volumens, die cubische Ausdehnung, von der Vergrößerung der einzelnen Dimensionen, der linearen Ausdehnung; bei den flüssigen und luftförmigen Körpern beobachtet man nur die cubische Ausdehnung. **Der Ausdehnungs-Coëfficient** (α) ist der Bruchtheil des Volumens oder einer Dimension, um welchen sich dieselben bei einer Temperaturerhöhung von 1° vergrößern. Ist das Volumen eines Körpers bei 0° gleich 1, so ist es nach gleichmäßiger Ausdehnung bei $t^0 = 1 + \alpha t$; das Volumen v_0 bei 0° wird daher $v_t = v_0 (1 + \alpha t)$ bei t^0. Die meisten festen und flüssigen Körper folgen aber nicht diesem Gesetze, sondern ihr Volumen ist bei t^0 meistens $v_t = v_0 (1 + At + Bt^2)$ wo A und B zwei verschiedene Coëfficienten sind. Will man auch hier die erste Fl. $v_t = v_0 (1 + \alpha t)$ gelten lassen, so muß man zufügen, daß der Ausdehnungs-Coëfficient α bei höherer Temperatur größer als bei niederer ist.

Ein nicht eingeschlossenes Luftvol. hat bei jeder Temp. nur den Druck von 1at zu überwinden, dehnt sich daher auch immer gleichviel aus. In den flüssigen und festen Körpern dagegen ist außerdem die innere Anziehung zu überwinden, die mit den Abständen der Mol. sich ändert und bei wachsenden Abständen kleiner wird; daher ist hier die Ausdehnung ungleichmäßig, wird bei höherer Temp. größer als für dieselbe Erhöhung bei niederer; doch ist diese Veränderung des Ausdehnungs-Coëff. gering, bei gewöhnlichen Versuchen unmerklich; auch mit dem Apparate für Ausdehnung der Metallstäbe, die so in einen Spiritustrog gelegt werden, daß ihr eines Ende gegen die feste Wand desselben, das andere aber an den kurzen Hebelarm eines Winkelhebels stößt, dessen längerer Arm ein auf einer Kreistheilung spielender Zeiger ist, kann für Metalle höchstens eine der Temp. proportionale Zunahme der Ausdehnung wahrgenommen werden; bei diesem, wie bei den anderen Versuchen kann man aber die sofort mit der Abkühlung wieder erfolgende Zusammenziehung leicht erkennen. Zur Wahrnehmung der Aenderung des Ausd.-Coëff. mit der Temp. sind genauere Versuche nöthig, die zahlreich angestellt wurden, und die sämmtlich die Richtigkeit der zweiten Formel ergeben, in welcher diese Aenderung ausgesprochen ist. So gibt z. B. Rußner (1882) an, daß der Ausd.-Coëff. von Guttapercha in Milliontel beträgt bei 1° 501, bei 10° 546, bei 20° 595, bei 30° 646 und bei 40° 695, was sich darstellen läßt durch die Fl. $v_t = v_0 (1 + 0{,}000\,496\, t + 0{,}000\,004\,96\, t^2)$; hieraus ist ersichtlich, daß die Zunahme des Ausd.-Coëff. mit der Temp. hier viel bedeutender ist als bei Metallen. Indessen ist die Zunahme des Ausd.-Coëff. hier ziemlich regelmäßig; bei anderen Körpern treten Unregelmäßigkeiten ein; so ist nach Rußner für Schwefelkrystalle $\alpha_{10} = 147$, $\alpha_{20} = 160$, $\alpha_{30} = 170$, $\alpha_{40} = 178$, $\alpha_{50} = 183$, $\alpha_{60} = 186$; diese abnehmende Zunahme mit der Temp. läßt sich durch eine Fl. darstellen, in welcher ein Glied mit t^3 negativ ist: $v_t = v_0 (1 + 0{,}000\,128\, t + 0{,}000\,001\,86\, t^2 - 0{,}000\,000\,015\, t^3)$. Bei anderen Körpern gehen die Unregelmäßigkeiten bis zu Ausnahmen, ja sogar bis zur Contraction bei Erhöhung der Temp.

Mitscherlich beobachtete (1828), daß die Krystalle der nicht regulären Systeme sich nach verschiedenen Richtungen ungleich ausdehnen, und zwar die optisch zweiachsigen nach allen 3 Dimensionen verschieden, die optisch einachsigen aber in den Richtungen senkrecht zur Hauptachse gleich, in der Richtung dieser Achse selbst aber weniger oder mehr; beim Beryll ist die Ausdehnung in letzter Richtung so stark, daß in den ersteren eine Contraction stattfindet. Viel besprochen wurde vor 15 Jahren die Ausnahme, daß gespannter Kautschuk sich bei Erhöhung der Temp. zusammenzieht, wofür Govi (1869) eine gekünstelte Erklärung gab; nach Untersuchungen von Lebedeff (1881) und Rußner (1882) ist aber die mit der Temp. wachsende Zunahme des Ausd.-Coëff. ebenso unzweifelhaft wie bei anderen Stoffen. Die Ausnahme ist nur scheinbar; der gespannte Kautschuk erfährt bei höherer Temp. eine Querdilatation und Längencontraction, weil sein Elasticitäts-Coëff. mit steigender Temp. rasch abnimmt; durch die Spannung tritt Anisotropie ein, die Kundt schon (1874) durch die Doppelbrechung gespannten Kautschuks auffand. Andere Ausnahmen erklärt man durch

Umlagerungen der Mol. Eilhard Wiedemann zeigte (1878), daß die Legirungen von Rose, Woods und Lipowitz bei den Temp. Contractionen annehmen, wo sie in eine andere Modification übergehen, und (1882) erwies er dieselbe Erscheinung für Alaune und andere Salze. Schwefel ist bekanntlich besonders geneigt, in verschiedenen Modificationen aufzutreten; ganz entsprechend wird nach Untersuchungen von Scichilone (1880) und Spring (1881) der Ausd.-Coëff. einiger Schwefelsorten in manchen Temperatur-Intervallen neg., d. h. es findet Contraction statt Ausdehnung statt. Die isomorphen Alaune dehnen sich nach Spring (1882) gleich, aber im Ganzen wenig aus, $\alpha = 26$ Milliontel; jedoch bei einer gewissen Temp., etwa 60°, zeigen sie starke Ausdehnung. So wird sich wohl auch durch Uebergang in andere Modificationen oder polymere Zustände die Erscheinung erklären, daß Jodsilber zwischen — 19 und + 70° sich zusammenzieht, statt sich auszudehnen (Fizeau 1867); dafür spricht schon die Beobachtung von Rodwell (1881), daß die Ausnahme des Jodsilbers nur für das Intervall — 60° bis + 142° gilt; auch andere Jodsalze zeigen ähnliche Erscheinungen. Hierdurch sind wir auch an der Schwelle der Aufhellung für das abweichende Verhalten des Wassers angelangt; denn E. Wiedemann weist speciell darauf hin, daß die Umlagerung der Mol. bei seinen Salzen schon vor dem Schmelzen beginnt.

Ein von fester Substanz umgebener Hohlraum verändert sich bei Temperaturveränderungen ebenso, als ob er aus der umgebenden Substanz bestände. Zur Erläuterung denke man sich den Querschnitt einer Glasröhre; den concentrischen Kreisring von Glas kann man sich aus unzähligen concentrischen Kreislinien gebildet denken; bei stattfindender Erwärmung verlängert sich jede dieser Glaslinien, wobei sie nach außen rücken muß; und diese Verlängerungen und Hinausrückungen sind dieselben, einerlei ob innerhalb einer solchen noch andere vorhanden sind oder nicht. Der Hohlraum wird also weiter und zwar gerade so viel weiter, als ob er ein Glasstab wäre. Zum experimentellen Nachweis kann man einen mit gefärbter Flüssigkeit gefüllten Glaskolben benutzen, durch dessen Stöpsel eine noch theilweise gefüllte Glasröhre geht. Taucht man denselben in heißes Wasser, so sinkt im ersten Augenblicke die Flüssigkeit, welche scheinbare Zusammenziehung die Vergrößerung des Hohlraumes beweist, die durch die zuerst erfolgende Ausdehnung der Glaswände geschieht. Läßt man den Kolben im heißen Wasser stehen, statt ihn rasch wieder heraus zu ziehen, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre wieder und geht weit über den ursprünglichen Stand hinaus, und zwar einfach deßhalb, weil jetzt auch die Flüssigkeit sich durch die eindringende Erwärmung ausdehnt, und zwar als Flüssigkeit stärker als das Glas und daher auch stärker als der Hohlraum, da dieser sich wie Glas ausdehnt.

Die Ausdehnungs-Coëfficienten der festen und flüssigen Körper. Lavoisier und Laplace (1778) legten Stäbe in ein Wasser- oder Oelbad, mit dem einen Ende gegen einen in Mauerwerk befestigten Stab, mit dem anderen Ende an einen Hebel stoßend, der um seine Achse drehbar ein Fernrohr trug; durch Erwärmung verlängert bewegten die Stäbe den Hebel und drehten dadurch das Fernrohr; die Größe der Drehung wurde an einer entfernt aufgestellten Skala abgelesen und daraus die linearen Ausdehnungscoëff. berechnet. — Neue Methoden sind von Fizeau (1864) und Matthiessen (1867). Fizeau legte dünne Platten der zu untersuchenden Stoffe auf eine Glasplatte und ließ durch beide homogenes Natriumlicht gehen; er erhielt dann gelbe und dunkle Newton'sche Ringe; bei der Erwärmung dehnte sich nun die Platte aus, das dünne Luftplättchen wurde dünner und die Ringe verschoben sich; aus der Größe der Verschiebung berechnete er den Ausdehnungscoëff. — Matthiessen benutzte den Auftrieb in Wasser, der für einen erwärmten Körper wegen seines größeren Vol. größer ist als bei niederer Temp.; aus der Zunahme des Auftriebes berechnete M. den Ausd.-Coëff. von Metallen und Legirungen. Wir führen einige dieser linearen Coëff. an in Milliontel der Länge: Eis 64, Cadmium 32, Zink 30, Blei 28, Zinn 23, Silber 20, Messing 19, Kupfer 17, Gold 15, Eisen 12, Stahl 11, Platin 9, Glas 8, Holz 3. Für die Legirungen fand M. im Allgemeinen die Coëff. gleich dem arithmetischen Mittel der Coëff. der Bestandtheile. Besonders groß ergaben sich nach Fizeau die Coëff. der Haloidsalze: Chlorkalium 38, Steinsalz 40, Salmiak 63, Chlorsilber 33. Den größten Ausd.-Coëff. unter den festen Körpern haben Kalium 83 und Natrium 72, größer als der des Quecksilbers, der linear nur = 61 ist (Ernst Hagen 1883). Hartgummi kommt dem Kalium fast gleich, indem sein α nach Kohlrausch (1873) = 80 und nach Fueß (1882) = 82 ist und stark mit der Temp. zunimmt. — Aus der linearen Ausdehnung ergibt sich leicht die cubische; sie ist nahezu das dreifache der linearen. Ist nämlich die Ausdehnung der Kanten eines Würfels $= x$, so wird der Inhalt 1 desselben $= (1 + x)^3 = 1 + 3x + 3x^2 + x^3$, worin man wegen der Kleinheit von x die höheren Potenzen vernachlässigen kann; das neue Vol. ist daher $= 1 + 3x$, also die cubische Ausdehnung $= 3x$. Obwohl dies nur annähernd richtig ist, so stimmen doch die Resultate der Rechnung mit den Versuchsresultaten. — Merkwürdig ist die Beobachtung von General Baeyer (1867), daß die Ausd.-Coëff. von Eisen- und Zinkstäben im Laufe der Jahre kleiner werden. Nach Comstock (1881) nimmt

ein stark erhitzter oder abgekühlter Zinkstab nicht wieder die frühere Länge bei gewöhnlicher Temp. an; es bleibt eine Veränderung von 15 bis 30μ.

Den Ausd.-Coëff. von Flüssigkeiten kann man mittels des sog. Gewichtsthermometers von Gay-Lussac finden; dasselbe besteht aus einem Glasgefäße, dessen Hals an einer Stelle ganz eng ausgezogen ist, so daß sich über dieser Stelle eine Art Trichter befindet. Man füllt das Gefäß mit der Flüssigkeit bis in den Trichter herauf, kühlt bis auf 0° ab, indem man das Gefäß in schmelzenden Schnee stellt, und entfernt dann die noch im Trichter bleibende Flüssigkeit. Dann erwärmt man bis zu einer bestimmten Temperatur und nimmt die ausgetretene Flüssigkeit weg. Aus dem Gewichte der heißen und der kalten Flüssigkeit berechnet man den Coëff. Kopp (1847) benutzte das Dilatometer, eine Röhre mit angeblasener Glaskugel, die man in neuester Zeit öfters durch ein gewundenes Reservoir ersetzte; Matthiessen bestimmte die Coëff. durch Eintauchen geschliffener Glasstücke in die Flüssigkeit nach seiner Auftriebsmethode. So ergaben sich die cubischen Ausdehnungscoëfficienten in Milliontel für Aether ca. 1500, Weingeist 1000, Brom 1000, Terpentinöl 900, Olivenöl 800, Schwefelsäure 600, Wasser 500, Quecksilber 180. Für viele Flüssigkeiten ist die Ausdehnung so ungleichmäßig, daß zur Darstellung die Fl. $v_t = v_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^3)$ angewendet werden muß; am gleichmäßigsten dehnt sich noch das Quecksilber aus, für dessen Volumen Matthiessen die Fl. gibt $v_t = v_0 (1 + 0{,}0001\,812t)$; Regnault gibt zwar auch eine Fl. mit der zweiten Potenz von t, doch ist der Coëff. derselben außerordentlich klein. Wegen der wichtigen Anwendung des Quecksilbers zu Barometern, Thermometern und zahlreichen anderen Meßapparaten wurde dasselbe am häufigsten untersucht. Dulong und Petit (1816) benutzten das Princip der communicirenden Gefäße; 2 comm. Röhren wurden mit Quecksilber gefüllt, die eine auf 0° abgekühlt, die andere erhitzt; in der letzteren hatte dann das Quecksilber einen höheren Stand; der Höhenunterschied, der genau mit dem Kathetometer beobachtet werden kann, macht die Berechnung der Ausdehnung möglich. Solche Berechnungen ergaben dann, daß die Ausdehnung des Quecksilbers von — 20° bis + 200° ziemlich gleichmäßig ist, und daß sie erst in der Nähe des Gefrierpunktes (— 40°) und des Siedepunktes (+ 357°) ungleichmäßig wird. Regnault gebrauchte einen vervollkommneten Apparat; seine Beobachtungen wurden von Neueren discutirt und so der Ausd.-Coëff. des Quecksilbers zwischen 0 und 100° auf 182 Milliontel ($^1/_{5555}$) festgestellt.

In den letzten Jahren wandten die Forscher ihre Thätigkeit vielfach den Ausd.-Coëff. zu, weil man dieselben mit anderen Größen in Verbindung gebracht und dabei überraschende Ergebnisse gefunden hat. Bekanntlich ordnet die moderne Chemie die Gruppen der Elemente nach deren Atomgewichten in periodische Reihen; dabei zeigt sich, daß das Atomvolumen der Elemente, im starren Zustande der Quotient des Atomgewichtes durch das sp. G., eine periodische Funktion des Atomgewichtes ist; d. h. trägt man die Atomgewichte als Abscissen und die Atomvolumina als Ordinaten auf, so erhält man eine auf- und absteigende Curve mit immer höher ansteigenden Maximalpunkten, die eine Darstellung der chemischen und phys. Eigenschaften der Elemente ist (Lothar Meyer 1870); z. B. an den Gipfelpunkten stehen die Metalle der Alkalien, an dem niedrigsten das Lithium, am höchsten das Caesium; die dehnbaren Metalle stehen an den Maximal- und den Minimalpunkten, die spröden auf absteigender Curve kurz vor den Minimalpunkten; die gasförmigen und die leicht schmelzbaren stehen auf den aufsteigenden Aesten und Maximalpunkten, die schwer- und unschmelzbaren auf absteigenden Aesten und Minimalpunkten. Indem sich derart auch phys. Eigenschaften als periodische Funktionen der Atomgewichte zeigten, lag der Gedanke nicht fern, auch den Ausd.-Coëff. mit den Atomgewichten zu vergleichen, und da die Stoffe von gleichem Atomvolumen, nämlich nach Avogadro die Gase, auch gleiche Coëff. haben, so lag am nächsten der Zusammenhang mit dem Atomvolumen. Wiebe multiplicirte (1878) das Atomvolumen jedes Elementes mit dessen Ausd.-Coëff. und erhielt hierdurch die molekulare Ausdehnung; als Curve dargestellt ergibt sich große Aehnlichkeit mit der Curve der Atomvolumina, so daß auch der Ausd.-Coëff. als eine periodische Funktion des Atomgewichtes bezeichnet werden darf; viele Producte sind nahezu gleich, die verwandten Elemente haben einfache Verhältnisse, z. B. As : Sb : Bi = 1 : 3 : 4 und Zn : Cd = 2 : 3 u. s. w. Später fand Wiebe ähnliche Uebereinstimmungen für die Ausdehnungen im Schmelz- und im Siedepunkte. Nach Spring (1881) verhalten sich die Coëff. von S, Se und Te umgekehrt wie die Atomgewichte, und sind (1881) die der isomorphen Alaune und der schwefelsauren Salze, die gleiche Atomvolumina haben, auch einander gleich. — Noch interessanter erscheint der Zusammenhang zwischen Ausd.-Coëff. und Schmelzpunkt; Carnelley sprach (1879) den Satz aus: „Je niedriger der Schmelzpunkt eines Elementes, desto größer ist der Ausd.-Coëff.“ An 31 Elementen bewährt sich der Satz; durch die Bestimmung der großen Coëff. der leicht schmelzbaren Metalle K und Na (Hagen 1883) hat er eine neue Bestätigung gefunden, ja scheint auch für Verbindungen zu gelten, wie z. B. die großen Coëff. von Hartgummi, Kautschuk und Guttapercha andeuten. Zu gleicher Zeit brachte Raoul Pictet denselben Gedanken in theoretischer Einkleidung; er geht von der Hypothese aus, daß die Ausdehnung des Vol. gleich

der mittleren Oscillationslänge der Mol. sei, und findet hieraus den Satz: das Product des Ausd.-Coëff. mit der absoluten Schmelztemp. und dem mittleren Abstande der Mol., der gleich der Cubikwurzel aus dem Atomvolumen ist, muß eine constante Größe sein; von 20 Elementen liegt wirklich das Product zwischen 4 und 5; Pictet hält hierdurch seine Ansicht für erwiesen, daß die Temp. durch die Amplitude bestimmt sei und daß das Schmelzen in einem Zerfallen der Mol. beruhe. Auch Wiebe hat zu derselben Zeit einen ähnlichen Satz für den Schmelzpunkt gefunden und dehnte denselben (1879) auf die Siedepunkte der Fettsäuren und deren Aether in folgender Gestalt aus: das Product aus dem absoluten Ausd.-Coëff. (auf das Molekularvolumen bezogen) und der absoluten Siedetemperatur ist ein durch die Anzahl der Atome im Molekül bestimmtes Vielfaches einer Constanten; der Satz gilt noch allgemeiner nach De Heen (1880) für die Homologen des Benzols und mehrere Reihen anderer organischen Flüssigkeiten. Endlich hat Wiebe auch die spec. Wärme mit dem Ausd.-Coëff. in Verbindung gebracht mit folgendem Satze (1879): Das Product des cubischen Ausd.-Coëff. mit der zwischen dem Schmelz- und Siedepunkt aufgenommenen Wärmemenge ist für das Atomgewicht der Elemente constant.

Das abweichende Verhalten des Wassers. Die Ausdehnung des Wassers 397 ist so ungleichmäßig, daß Kopp (1847) zur Darstellung derselben zwischen 0° und 100° vier verschiedene Formeln anwendet, welche außer der ersten und zweiten auch noch die dritte Potenz der Temperatur enthalten. Außerdem zeigt aber das Wasser noch die Abweichung von der allgemeinen Regel der Ausdehnung, daß es bei Erwärmung von 0° bis 4° sich nicht ausdehnt, sondern zusammenzieht, und umgekehrt bei der Abkühlung von 4° bis 0° sich nicht zusammenzieht, sondern ausdehnt, wozu noch die weitere Abweichung tritt, daß es beim Uebergange in den festen Zustand sich nicht wie andere erstarrende Stoffe zusammenzieht, sondern abermals ausdehnt; die Ausdehnung von 4° bis 0° beträgt 139 Milliontel und bei dem Erstarren circa 10%. Das Wasser hat demnach seine größte Dichte, sein größtes spec. Gewicht bei 4°, genauer nach Exner (1873) 3,945°; von hier an weiter erwärmt dehnt es sich immer, aber ungleichmäßig aus; zwischen 8 und 9° hat es wieder dieselbe Dichte, dasselbe Volumen wie bei 0°. Ist sein Volumen bei 0° = 1, so ist dasselbe bei 4° = 0,999877, bei 10° = 1,000124, bei 20° = 1,001567, bei 40° = 1,007531, bei 60° = 1,016590, bei 80° = 1,027581, bei 100° = 1,042986, woraus die Unregelmäßigkeit zu erkennen ist.

Aeltere Untersuchungen, sowie die neueren von Matthiessen geben die Volumina des Wassers etwas größer als Kopp. Volkmann hat (1881) mit zu Grundelegung des Quecksilbercoëff. 0,000182 die sämmtlichen Beobachtungsresultate vereinigt und gibt, das Vol. bei 4° = 1 gesetzt, für 0° = 1,000122, für 10° = 1,000261, für 20° = 1,00173, für 30° = 1,00425, für 40° = 1,00770, für 50° = 1,01197, für 60° = 1,01694, für 70° = 1,02261, für 80° = 1,02891, für 90° = 1,03574, für 100° = 1,04323. Das Verhalten des Wassers läßt sich beobachten an einer mit Wasser von 9° gefüllten Thermometerröhre, deren Kugel man in schmelzendes Eis taucht; man sieht dann das Wasser fallen, dann wieder steigen, bis es bei 0° die Röhre wieder anfüllt. Auch kann ein gläserner mit Quecksilber beschwerter Schwimmer benutzt werden, der in Wasser von 0° zu Boden sinkt, bei Erwärmung bis zu 4° steigt und später wieder sinkt. Weidner (1867) fand, daß die Ausdehnung des Wassers bei der Abkühlung von 4 bis 0° in Thermometerröhren, wo es bekanntlich bis — 10° flüssig bleibt, auch noch unter Null fortdauert, durchschnittlich 177 Milliontel für jeden Grad beträgt und mit abnehmender Temp. zunimmt. Die Temp. des Dichtemaximums des Wassers bleibt nicht unter allen Umständen 4°. Schon Despretz fand (1840), daß durch Lösung fester oder flüssiger Körper das Maximum erniedrigt wird und zwar um Beträge, die den Gewichtsmengen proportional sind; so erniedrigt ein Zusatz von 1¼% Kochsalz das Max. um fast 3°, der doppelte Zusatz um 6°; entsprechend fand Edlund (1863) das Dichtigkeitsmax. des Meerwassers bei — 5°; ähnliches gilt für Alkohol, Natriumsulfat u. s. w.; das Verhältniß der Erniedrigung zum Zusatz ist constant. Nach Folgheraiter (1881) gilt dies Gesetz auch für Gallussäure, nicht aber für Salicylsäure. Angeregt von Tait, der die Tiefseetemperaturmessungen wegen des hohen Wasserdrucks einer Correctur bedürftig erachtete, stellten Marshall, Smith und Osmond (1882) Beobachtungen über den Einfluß hohen Drucks auf das Dichtemaximum an und fanden, daß unter 180at das Dichtemaximum des Wassers bei 1,3° und unter 600at sogar tiefer als 0° liegt.

Das abweichende Verhalten, die Anomalie des Wassers ist von großer Wichtig-

keit im Haushalte der Natur: ohne dasselbe würden die Seen, Flüsse und Meere im Winter zufrieren und dadurch die Existenz von Wasserthieren und Wasserpflanzen unmöglich machen, sowie zahlreiche andere Unzuträglichkeiten schaffen. Wenn sich nämlich das Wasser an der Oberfläche abkühlt (bei über 4°), so wird es durch Zusammenziehung dichter und schwerer und sinkt zu Boden, während das wärmere Wasser aufsteigt; so kühlt sich allmälig die ganze Menge bis auf 4° ab. Würde sich durch weitere Abkühlung das Wasser abermals zusammenziehen, so würde auch jetzt immer das an der Oberfläche abgekühlte und verdichtete Wasser zu Boden sinken, das wärmere würde sich heben, noch tiefer abgekühlt werden und dadurch wieder sinken, um dem früher gesunkenen Platz zu machen; und so würde sich allmälig alles Wasser bis auf 0° abkühlen. Wäre nun das Eis dichter und dadurch schwerer als Wasser, wie andere Körper im festen Zustande schwerer als im flüssigen sind, so würden die jetzt entstehenden Eismassen auch zu Boden sinken und bald würde die ganze Wassermasse durch die kalte Winterluft in Eis verwandelt sein. Dies Alles ist aber unmöglich, weil das Wasser von 4° das schwerste Wasser ist, und weil Eis leichter ist als Wasser von 0°; deßhalb kann nach der Abkühlung von 4° an das Wasser von 3, 2, 1° wegen seiner Leichtigkeit nicht sinken, das schwerere Wasser von 4° bleibt immer auf dem Boden; und wenn sich Eis bildet, so bildet dasselbe wegen seiner Leichtigkeit eine Decke, und die schlechte Leitungsfähigkeit des Wassers und des Eises schützen das Bodenwasser vor einer Erniedrigung seiner Temp. In dieser Weise verhält sich aber nur das stehende Wasser; in Flüssen dagegen, wo Strömungen nach allen Richtungen stattfinden, kann an einzelnen Stellen die Gesammtmasse sich bis unter 0° abkühlen; denn das ruhig fließende Wasser, das keine Berührung mit festen Körpern hat, kann eine Temp. unter 0° annehmen, ohne zu gefrieren; wenn daher an einer Stelle die Gesammtmasse so tief abgekühlt ist, oder wenn das Wasser eine Stromrichtung nach dem Boden zu hat, so tritt durch die Berührung mit dem Boden die Krystallisation ein, es bildet sich **Grundeis**, das später durch Auftrieb steigt und Bodenkörper mit auf die Oberfläche hebt. — Auch die molekulare Veränderung, die Ausdehnung bei der Eisbildung, geschieht mit großer Kraft; geschlossene mit Wasser gefüllte Gefäße, selbst Bomben springen beim Gefrieren. Eine eiserne mit Wasser gefüllte und zugeschraubte Flasche springt, wenn man sie in eine Kältemischung legt; dasselbe geschieht, wenn sie mit geschmolzenem Wismuth gefüllt ist; Felsen, deren Spalten und Risse Wasser enthalten, springen beim Gefrieren; kleinere Stücke werden von ihnen abgelöst und dann in ähnlicher Weise, wie auch der gefrorene Bodengrund, weiterzerlegt; auf gleiche Weise beginnt die Verwitterung. Diese Wirkung des Eises ist auch schädlich, indem sie Bäume und Reben sprengt, Straßenpflaster, Schwellen und Mauern zerstört u. s. w. — Von dem **Verständniß der Anomalie** des Wassers sind wir nicht mehr so weit entfernt als bisher. Zunächst steht das Wasser nicht mehr allein, sondern Jodsilber und andere Jodsalze, gewisse Sorten des Schwefels, die leicht flüssigen Metallegirungen, die Alaune und andere Salze haben ebenfalls in gewissen Temperatur-Intervallen Contraction statt Ausdehnung, und man ist genöthigt, bei denselben Uebergänge in andere Modificationen, Polymerisationen und Depolymerisationen anzunehmen und dieselben besonders in der Nähe der Schmelzpunkte vorauszusetzen. Das so sehr verschiedene Verhalten des Wassers bei verschiedenen Temp., z. B. seine im Allgemeinen größere Lösungskraft und chemische Energie bei höherer Temp. nöthigen auch zur Annahme, daß die Mol. desselben z. B. bei höherer Temp. eine andere Atomlagerung haben als bei niederer, daß z. B. bei höherer Temp. Wasser $= H_6O_3$ sei, daß an einer Stelle, wo der Ausd.-Coeff. eine starke Aenderung zeigt, daraus H_4O_2 entsteht, und bei 4° endlich H_2O. Nun ist der Erstarrungspunkt 0° in der Nähe; bei diesem gruppiren sich die Wassermol., wie die gefrorenen Fensterblumen und die Schneeflocken zeigen, zu langen Nadeln, die im dichten Eis jedenfalls zahllose Poren bilden und dadurch die starke Ausdehnung des gefrierenden Wassers bewirken. Da nun nach E. Wiedemann die Umlagerung der Mol. schon vor dem Schmelzpunkte beginnt, so wird wohl auch im Wasser von 4° die Nadelbildung schon mit sehr kleinen Theilchen ihren Anfang nehmen und sich bis 0° verstärken, wodurch die Ausdehnung von 4 bis 0° erklärlich scheint.

398 **Der Ausdehnungs-Coëfficient der Luftarten und das Gaylussac-Mariotte'sche Gesetz.** Nach den genaueren Untersuchungen von Rudberg, Regnault und Magnus (1833—42) ist der Ausdehnungscoëfficient der Luftarten $\alpha = 0{,}003665$ oder nahezu $= 1/273$. Wenn also ein Gas auf 273° erwärmt wird, so nimmt es das doppelte Volumen ein, bei $2 . 273 = 546°$ das dreifache Volumen, bei 819° das vierfache Volumen u. s. w.; bleibt aber das erhitzte Gas auf seinem ursprünglichen Volumen, weil es in dasselbe eingeschlossen ist, so hat es bei 273° die Hälfte, bei 546° den dritten Theil, bei 819° den vierten Theil seines bei diesen Temperaturen unter dem gewöhnlichen Luftdrucke natürlichen Volumens; folglich

wird seine Spannung nach dem Mariotte'schen Gesetze 2, 3, 4 .... mal so groß, ist also bei 273° gleich 2 Atm., bei 546 gleich 3 Atm. u. s. w.; man nennt diese Zunahme der Gasspannung mit der Gastemperatur das Gaylussac-Mariotte'sche Gesetz. Der mathematische Ausdruck desselben ist $vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t)$, worin p_0 und v_0 die Gasspannung und das Volumen bei 0° und p und v dieselben Größen bei t° bedeuten.

Beweis. Ist das Volumen eines Gases bei $0° = v_0$, so nimmt dasselbe für jeden Grad um den Bruchtheil α zu, vorausgesetzt, daß der anfängliche Druck p_0 unverändert erhalten bleibt; die Zunahme bei t° beträgt daher $v_0 \alpha t$; folglich ist bei t° das Volumen

$$v' = v_0 + v_0 \alpha t \text{ oder } v' = v_0 (1 + \alpha t) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (43)$$

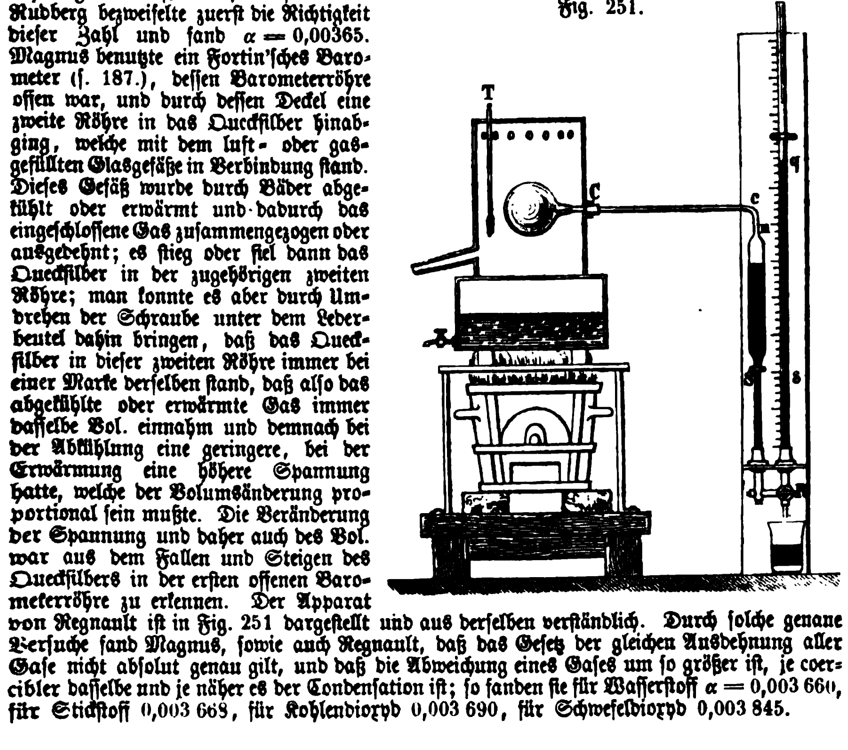
Läßt man nun das Gas von dem Volumen v' bis zum Volumen v sich ausdehnen, und zwar so, daß die Temperatur unverändert dieselbe bleibt, was man durch geeignete Wärmezufuhr erreichen kann, so geht der Druck p_0 in p über. Da nach dem Mariotte'schen Gesetze die Volumina in umgekehrtem Verhältnisse zu den Druckkräften stehen, so ist $v' : v = p : p_0$ oder $vp = v'p^0$. Wird hierin statt v' sein eben gefundener Werth gesetzt, so ergibt sich

$$vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (44)$$

Von diesem allgemeinen Ausdrucke des Mariotte-Gaylussac'schen Gesetzes ist (43) eine specielle Form, die für den Fall gilt, daß während der Erwärmung und Ausdehnung der Druck derselbe bleibe, daß z. B. das Gas in freier Luft erwärmt werde. Ist das Gas eingeschlossen, bleibt also v unverändert, so nimmt (44) die zweite specielle Form an $p = p_0 (1 + \alpha t)$, aus welcher man die Zunahme der Spannung eines Gases mit der Temperatur berechnen kann. In 54. wurde das Gesetz durch die kinetische Theorie der Gase bewiesen.

Von den verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Ausd.-Coëff. der Gase sei die von Gaylussac, Magnus und Regnault erwähnt. Gaylussac benutzte ein Dilatometer, in dessen Kugel durch einen in die Röhre gebrachten Quecksilbertropfen trockene Luft abgesperrt wurde; das Verhältniß der einzelnen Skalentheile der Röhre zu dem Vol. der Kugel war vorher genau bestimmt; dann wurde die Kugel in ein Wassergefäß mit Thermometer gebracht und das Wasser erwärmt; aus der Stellung des Tropfens ergab sich dann die Ausdehnung der Luft = 0,325 für 100°. Rudberg bezweifelte zuerst die Richtigkeit dieser Zahl und fand $\alpha = 0{,}00365$. Magnus benutzte ein Fortin'sches Barometer (s. 187.), dessen Barometerröhre offen war, und durch dessen Deckel eine zweite Röhre in das Quecksilber hinabging, welche mit dem luft- oder gasgefüllten Glasgefäße in Verbindung stand. Dieses Gefäß wurde durch Bäder abgekühlt oder erwärmt und dadurch das eingeschlossene Gas zusammengezogen oder ausgedehnt; es stieg oder fiel dann das Quecksilber in der zugehörigen zweiten Röhre; man konnte es aber durch Umdrehen der Schraube unter dem Lederbeutel dahin bringen, daß das Quecksilber in dieser zweiten Röhre immer bei einer Marke derselben stand, daß also das abgekühlte oder erwärmte Gas immer dasselbe Vol. einnahm und demnach bei der Abkühlung eine geringere, bei der Erwärmung eine höhere Spannung hatte, welche der Volumsänderung proportional sein mußte. Die Veränderung der Spannung und daher auch des Vol. war aus dem Fallen und Steigen des Quecksilbers in der ersten offenen Barometerröhre zu erkennen. Der Apparat von Regnault ist in Fig. 251 dargestellt und aus derselben verständlich. Durch solche genaue Versuche fand Magnus, sowie auch Regnault, daß das Gesetz der gleichen Ausdehnung aller Gase nicht absolut genau gilt, und daß die Abweichung eines Gases um so größer ist, je coercibler dasselbe und je näher es der Condensation ist; so fanden sie für Wasserstoff $\alpha = 0{,}003\,660$, für Stickstoff 0,003 668, für Kohlendioxyd 0,003 690, für Schwefeldioxyd 0,003 845.

Fig. 251.



Die Formel $p = p_0 (1 + \alpha t)$ macht es möglich, den **absoluten Nullpunkt** zu finden, d. i. diejenige Temperatur, bei welcher ein Körper gar keine Wärme enthält, bei welcher also seine Moleküle in absoluter Ruhe und in größtmöglicher Nähe bei einander sind; da die Spannung der Gase ein Product der Bewegung der Moleküle ist, so ist bei dem absoluten Nullpunkte die Gasspannung $= 0$, folglich ist $p_0 (1 + 0{,}003665 t) = 0$; da in dieser Gleichung p_0 einen reellen Werth hat, so ist sie nur möglich, wenn $1 + 0{,}003665\, t = 0$, d. h. wenn $t = -273^0$ ist; der **absolute Nullpunkt liegt also bei -273^0 C**; die von diesem Punkte an gerechnete Temperatur ist die absolute Temperatur; die absolute Temperatur ist die lebendige Kraft der Moleküle.

Die Gleichung (44) $vp = R (1 + \alpha t)$, wo $v_0 p_0 = R$ gesetzt ist, könnte als Zustandsgleichung der Gase gelten, wenn sie außer den Gesetzen von Mariotte und Gaylussac auch die Abweichungen von denselben enthielte. Um sie dafür umzuformen, erklärt van der Waals (1873), müsse statt v die Größe $v - b$ gesetzt werden, in welcher b das 4fache Volumen der Moleküle bedeutet. Ebenso darf nach van der Waals die Anziehung der Moleküle nicht vernachlässigt werden, wo es sich um kleine Abweichungen handelt; da sie zwei Moleküle einander nähert, so erhöht sie den Gasdruck, und zwar, wie leicht zu ersehen, um einen Betrag, der dem Quadrat der Dichte direct, also dem des Volumens umgekehrt proportional ist; wird die specifische Anziehung $= a$ gesetzt, so ist $p + a/v^2$ statt p einzuführen; demnach ist die **Zustandsgleichung der Gase**

$$(p + a/v^2)(v - b) = R(1 + \alpha t) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (45)$$

Budde, der (1874) selbständig auf die Nothwendigkeit von b für H gelangt war, findet für $b = 0{,}0007$, wenn das Vol. v des Gases $= 1$ ist; van der Waals gab schon (1873) für jenes Gas $b = 0{,}000\,69$, für Luft 0,0026, für Kohlensäure 0,003; auch fand er schon damals die Constante $a = 0$ für H, für Luft 0,0037, für CO_2 0,0111. Diese Constanten sind von hoher Bedeutung für die Theorie der Dämpfe und des kritischen Punktes. — Daß b das vierfache Vol. der Mol. ist, erklärt v. d. W. aus den molekularen Stößen; daß die Anz. der Mol. nicht in allen Fällen zu vernachlässigen ist, darauf deuten manche Erscheinungen, z. B. die Lufthaut, die Absorption, insbesondere aber die Beobachtung von Joule und Thomson, daß bei der freien Ausdehnung der Gase eine sehr geringe Erniedrigung der Temp. eintritt. — Die Fl. (45) spricht die Geltung der Gasgesetze und die Abweichungen deutlich aus. Bei geringen Drucken und großen Volumina verschwinden die Glieder a/v^2 und b, die Gase folgen dem Gesetze $pv = R(1 + \alpha t)$. Wenn a sehr klein oder gar wie bei H Null ist, überwiegt der Einfluß von b; bei großem Drucke wird v durch b mehr vergrößert als bei kleinem, die Compressibilität ist geringer. Umgekehrt verhalten sich die meisten Gase. Bei ihnen überwiegt zuerst der Einfluß von a, der p vergrößert und dadurch v verkleinert; die Compressibilität ist bei geringem Drucke stärker; bei hohem Drucke verschwindet das Glied mit a gegen p, der Einfluß von b überwiegt, die Compr. wird geringer; dazwischen liegt ein Minimum. Bringt man die Fl. (45) auf die Gestalt $pv - (1 + a)(1 - b)(1 + \alpha t) - a/v + ab/v^2 + bp$, die für gleichbleibende Temp. die Form annimmt $pv = C - a/v + ab/v^2 + bp$, so zeigt sich, daß das Min. eintritt, wenn $a/v = ab/v^2 + bp$ ist. Je höher die Temp., um so größer wird C, um so geringer werden die Abweichungen. In ähnlicher Weise findet man die Abweichungen vom Gaylussac'schen Gesetze; wo $a = 0$ ist, wie für H, ist α kleiner als durchschnittlich und ändert sich fast nicht; bei den anderen Gasen bedingt der Einfluß von a, daß α mit dem Drucke bis zu einem Max. zunimmt und dann fortwährend abnimmt, daß das Max. da liegt, wo pv ein Min. ist und mit steigender Temp. verschwindet. — Clausius zeigte (1880), daß b nicht ganz unabhängig von der Temp., also nicht ganz constant ist; Roth fand für Aethylen bei 18° 0,0798, bei 183° 0,0587.

399 **Anwendung der Ausdehnung durch die Wärme.** Die wichtigste Anwendung der Ausdehnung durch die Wärme ist

1. Das Thermometer (Drebbel 1605, Fahrenheit 1714). Man benutzt zu dem gewöhnlichen Thermometer (s. 47.) Quecksilber in ein Glasdilatometer gefüllt, weil 1. das Glas sich außerordentlich wenig, das Quecksilber aber im Verhältnisse zum Glase ziemlich beträchtlich ausdehnt; weil 2. das Quecksilber erst bei -40^0 gefriert und bei $+360^0$ siedet, also den Temperaturen des gewöhnlichen Lebens

genügt, und weil 3. die Ausdehnung des Quecksilbers zwischen — 25° und + 200° gleichmäßig erfolgt, was man daraus ersieht, daß sich das Quecksilber, mit einem Luftdilatometer zusammen erwärmt, immer um gleichviel ausdehnt, wenn sich die Luft um gleichviel ausdehnt, deren Ausdehnung bekanntlich gleichmäßig erfolgt. Man hat als feste Grundpunkte den Schmelzpunkt des Schnees oder Eises (Eispunkt, Gefrierpunkt) und den Siedepunkt des Wassers gewählt, weil diese Punkte immer leicht wieder zu bestimmen sind, und weil die Stellung des Quecksilbers an denselben nicht eine vorübergehende, sondern eine länger andauernde ist, weil also dieselben mit großer Schärfe angegeben werden können. Die Bestimmung der Punkte geschieht in der Weise, daß man das Thermometer mit seiner Kugel in eine Schüssel voll Schnee oder gestoßenen Eises in ein warmes Zimmer bringt; es fällt dann zuerst das Quecksilber stark, fängt hierauf allmälig an zu steigen, bleibt aber fest stehen, wenn das Eis oder der Schnee anfangen zu schmelzen, und steht so lange an demselben Punkte, bis aller Schnee, alles Eis geschmolzen ist, selbst wenn man ein Feuer unter die Schüssel bringt; dies ist der Eispunkt. Ist alles Eis geschmolzen, so steigt das Quecksilber und zwar um so rascher, je schneller die Erhitzung erfolgt, bleibt aber wieder stehen, wenn das Wasser zu kochen beginnt, und bleibt genau an derselben Stelle, bis alles Wasser fortgekocht ist, selbst wenn während des Kochens die Kugel allmälig aus dem Wasser heraustritt und nur von den aufsteigenden Dämpfen umhüllt ist; dies ist der Siedepunkt. Der Grund dieses festen Stehenbleibens liegt darin, daß beim Schmelzen wie beim Sieden eines Körpers alle zugeführte Wärme zur Schmelzung wie zur Verdampfung verbraucht wird, aber nicht zur Erhöhung der Temperatur, was später noch genauer zu betrachten ist; wir werden dort auch erfahren, daß der Siedepunkt sich bedeutend mit dem Luftdrucke ändert; deßhalb müssen Thermometer entweder zu einer Zeit angefertigt werden, wenn der Barometerstand 76^{cm} beträgt, oder es muß aus den Tabellen über die Spannung der Dämpfe entnommen werden, bei welcher Temperatur das Wasser siedet, wenn es unter dem augenblicklichen, von 76^{cm} abweichenden Drucke steht; beträgt diese Temperatur etwa 98° oder 102°, so hat man den Raum zwischen dem Eispunkte und dem Siedepunkte in 98 oder 102, nicht aber in 100 Grade zu theilen. Auch der Eispunkt ist nicht ganz unabhängig vom Luftdrucke; doch wird er erst durch einen Druck von 8^{at} um $^1/_{18}$° erniedrigt; folglich kann dieser Einfluß hier außer Acht bleiben.

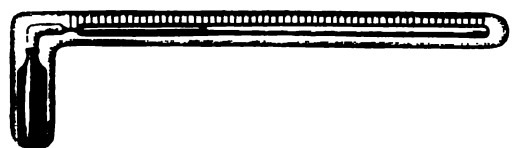
Bei der **Anfertigung** des Thermometers muß man sich erst überzeugen, ob das Innere der Röhre vollkommen cylindrisch ist; man bringt einen Tropfen Quecksilber in dieselbe und mißt, ob dieser überall gleiche Länge hat, andernfalls die Röhre zu verwerfen ist. Dann wird die Röhre in siedender Salpetersäure gebadet, um allen organischen Stoff zu entfernen, mit destillirtem Wasser gewaschen und in einem heißen Luftstrome getrocknet. Alsdann bläst man auf der Glasbläserlampe an beiden Enden Gefäße an, am einen Ende ein geschlossenes, am anderen ein offenes; in das offene wird das wohl gereinigte, gewaschene und getrocknete Queck. gegossen und nun die Röhre in die Kohlengluth eines geneigten Verbrennungsofens gebracht; die Luft entweicht durch das offene Gefäß, und beim Abkühlen nimmt das Queck. ihre Stelle ein; das Queck. muß in der Röhre mehrmals zum Sieden gebracht werden, um jede Spur von Feuchtigkeit oder adhärirender Luft zu verjagen. Vor dem Zuschmelzen erhitzt man bis zu der höchsten Temp., die das Thermometer anzeigen soll, um überflüssiges Queck. zu beseitigen, oder man kühlt bis zu dem beabsichtigten Minimum ab, um zu sehen, ob dafür genug Queck. vorhanden ist; dann erhitzt man abermals, bis das Queck. die ganze Röhre füllt und schmilzt dieselbe dann schnell zu, damit sie luftfrei bleibe. Nun bestimmt man den Eispunkt durch Einbringen des Gefäßes in schmelzendes Eis. Bei der Bestimmung des Siedepunktes muß bedacht werden, daß siedendes Wasser je nach dem Stoffe seines Gefäßes, nach seiner Höhe und seiner Reinheit den Siedepunkt ändert, daß dagegen die Temp. des Dampfes hiervon unabhängig ist; man hängt daher das Gefäß in die Dämpfe siedenden Wassers, wozu man eigene Apparate hat. Besser ist es, die mit Queck. gefüllte Röhre einige Monate liegen zu lassen, ehe man die festen Punkte bestimmt, weil sonst eine „Erhebung des Nullpunktes" um 1° oder mehr stattfindet,

welche von einem Zusammenpressen der luftleeren Röhre durch die äußere Luft herrührt. Ueberhaupt muß man die Richtigkeit der beiden Punkte manchmal controliren, wenn die Beobachtungen wissenschaftliche Genauigkeit in Anspruch nehmen wollen. Für eine solche reicht auch die geometrische Theilung des Zwischenraumes der Punkte nicht aus, weil genau cylindrische Röhren äußerst selten sind und demnach gleichen Längentheilen nicht gleiche Volumina entsprechen; man muß daher die Röhre in gleiche Volumina theilen, d. h. calibriren; die einfachste Methode ist folgende: Durch einen kurzen Stoß trennt man von dem Queckf. eine Säule ab ungefähr gleich der Hälfte der Linie 0—100; diese schiebt man dann so, daß ihr eines Ende das eine Mal an dem Siedepunkte liegt, das andere Ende das andere Mal an dem Nullpunkte; zwischen den nahe beisammen liegenden anderen Säulenenden läßt sich leicht die Mitte angeben, d. i. Punkt 50; ebenso bestimmt man nun Punkt 25 und 75 u. s. w.

Für niedere Temp. wendet man **Weingeistthermometer** an, welche dem Quecksilberthermometer gleich gebaut und gleich construirt sind, aber auch **Metallthermometer**; dieselben beruhen auf der ungleichen Ausdehnung der Metalle durch die Wärme. Sind 2 gleiche Lamellen verschiedener Metalle vielfach auf einander genietet, so biegt sich das Lineal beim Erhitzen, weil nur so das stärker ausgedehnte Metall seine größere Länge annehmen kann; ist ein solcher Doppelstreifen schon gekrümmt, so verstärkt sich seine Krümmung beim Erhitzen; hat er die Form einer vielfach gewundenen Spirale, deren äußeres Ende fest, das innere aber frei ist und einen Zeiger trägt, so muß sich durch Erhitzen die Zahl der Windungen vermehren, der Zeiger muß sich drehen. Breguets Metallthermometer (1817) besteht aus auf einander gelötheten Streifen von Platin, Gold und Silber, welche eine Drahtspirale bilden, deren oberes Ende in einem Bügel hängt, während das untere den auf einer Skale spielenden Zeiger trägt; man hat auch Metallthermometer in Dosenform, in denen die Windungen der Spirale in einer Ebene liegen. Solche Metallthermometer kann man auch bei höheren Temp. benutzen. Thermometer zum Messen hoher Temp. nennt man **Pyrometer**; sie sind noch wenig befriedigend. Muschenbroek (1750) benutzte die Ausdehnung von Metallstäben, die er durch ein Räderwerk auf einen Zeiger übertrug. — Wedgwoods Pyrometer (1782) bestand aus 2 unter einem Winkel auf eine Messingplatte genieteten Messingleisten und aus Thoncylindern von 1/2″ Dm.; ein Thoncyl. wurde in das Feuer gebracht, dort verkleinerte er durch Schwinden seinen Dm. und ließ sich dann weiter in den Winkel der Leisten einschieben als vorher; aus der Lage des Thoncyl. ergab sich die Temp. — Pouillets Pyrometer (1836), auch von ihm Universalthermometer genannt, ist ein Luftherm. z. B. in der Form des App. von Regnault (Fig. 251); in den zu prüfenden Raum wird die Hohlkugel von Platinblech oder Porzellan gebracht, die durch eine Platinröhre mit einer von 2 communicirenden, quecksilbergefüllten Glasröhren in Verbindung steht; die Luft in der Platinkugel erhält durch die Hitze eine höhere Spannung, die man an der offenen Röhre ablesen kann; setzt man diesen Werth von p, sodann den von p_0 und α in die Fl. $p = p_0 (1 + \alpha t)$ ein, so läßt sich t berechnen. Nach dieser Methode fand Pouillet: Anfangende Rothglut 525°, Dunkelroth 700°, Kirschroth 900°, Orangegluth 1100°, Gelbgluth 1200°, Weißgluth 1300°, blendende Weißgluth 1500°. Pettersson hat (1882) ein Luftthermometer für constanten Druck angegeben. — Pouillets magnetisches Pyrometer besteht aus einem Flintenlauf, der an beiden Enden mit Platindrähten zusammengeschweißt ist, welche an einen Thermomultiplicator gehen; das eine Ende wird in den zu prüfenden Raum gebracht, wodurch ein Thermostrom entsteht, der die Magnetnadel ablenkt und hierdurch die Temp. erkennen läßt. In Becquerels thermoelektrischem Pyrometer ist eine Combination eines Platin- und eines Palladiumdrahtes angewendet.

Zum Messen des Maximums und des Minimums der Temp. innerhalb eines Zeitraumes dient das **Thermograph** (Rutherford 1794). Das Maximumthermometer ist ein Quecksilbertherm., in dessen Röhre vor dem Queckf. ein Eisenstäbchen liegt; beim Steigen wird dieses Stäbchen fortgeschoben, bleibt aber beim Fallen liegen und gibt so die höchste Temp. an; durch Schütteln oder einen Magnet kann es wieder an das Quecksilber zurückgeführt werden. An diesem Instrument wird mancherlei ausgesetzt und als Ersatz das Maximumtherm. von Negretti und Zambra empfohlen

Fig. 252.



(Fig. 252); die Röhre desselben hat eine so starke Einschnürung, daß das Queckf. wohl bei der Ausdehnung durchgetrieben wird, bei der Zusammenziehung aber liegen bleibt. Das Minimumtherm. ist ein Weingeisttherm., in welchem innerhalb des Weingeistes ein kleines Glasstäbchen liegt, das beim Fallen von der Flüssigkeitshaut mitgenommen wird und dann beim

Steigen liegen bleibt. — Zum Messen von Temperaturdifferenzen dient Leslies (1804) Differentialthermometer. Als das feinste aller Thermometer galt bisher die Thermosäule mit Thermomultiplicator, womit sich nach Melloni ein Temperaturunterschied von $^1/_{5000}{}^0$ angeben läßt (438. u. 496.). Jedoch soll Langleys Bolometer (1881) noch $^1/_{100\,000}{}^0$ angeben; dasselbe enthält ein galvanisches Element und ein Galvanometer, zu welchem der Strom auch durch 2 Streifen oder Gitter von Metall derart geleitet wird, daß er in 2 gleichen Hälften die Nadel entgegengesetzt umkreist, wodurch dieselbe unter gewöhnlichen Umständen nicht abgelenkt wird. Wenn aber das eine Gitter von Wärmestr. getroffen wird, so verstärkt sich sein Widerstand und es findet Ablenkung statt.

Fig. 253.

400

2. **Die Compensation.** Durch eine Erhöhung der Temp. wird das Pendel einer Uhr länger und ebenso an einer Taschenuhr der Dm. der Unruhe größer, wodurch die Schw. verlangsamt werden und die Uhren nachgehen; im Sommer gehen daher die Uhren nach, im Winter vor, wenn sie nicht mit einer Einrichtung versehen sind, welche den Einfluß der Wärme aufhebt, und die man deßhalb Compensation nennt. Die Compensation des Pendels geschieht durch eine solche Verbindung von Metallstangen von verschiedenen Ausd.-Coëff., welche die Pendellänge bei allen Temp. gleich groß erhält. Fig. 253 stellt ein Compensationspendel vor; das eine Metall ist durch stark ausgezogene, das andere durch gestrichelte Linien angedeutet. Die Pendellänge L = AK sei für 0° durch L_0, für t° durch L_t bezeichnet. Offenbar ist L = AB + CD + EK − EF, worin die Länge AB + CD + EK = l aus dem einen Metall mit dem Ausd.-Coëff. α und die Länge EF = l' aus dem anderen vom Ausd.-Coëff. β besteht. Sind diese Längen bei 0° durch l_0 und l'_0 bezeichnet, so ist $L_0 = l_0 - l'_0$ und

$$L_t = l_0 (1 + \alpha t) - l'_0 (1 + \beta t) = l_0 - l'_0 + t (\alpha l_0 - \beta l'_0).$$

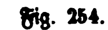
Da nun $L_t = L_0$ sein soll, so muß $t (\alpha l_0 - \beta l'_0) = 0$ sein, d. h. $\alpha l_0 = \beta l'_0$, woraus $l_0 : l'_0 = \beta : \alpha$, d. h. die Längen der verschiedenen Metalle verhalten sich umgekehrt, wie ihre Ausd.-Coëff. (Rostpendel, Quecksilbercompensation). Bei den Unruhen geschieht die Compensation durch eine Theilung des Ringes in 2 Halbringe, welche an ihren inneren Enden kleine Gewichte tragen und aus einem Stahl- und einem Messingstreifen zusammengelöthet sind; durch Erwärmung wird zwar der Dm. größer, zu gleicher Zeit werden aber auch durch stärkere Krümmung der Halbringe die Gewichtchen mehr nach innen geschoben und bleibt hierdurch das Trägheitsmoment constant.

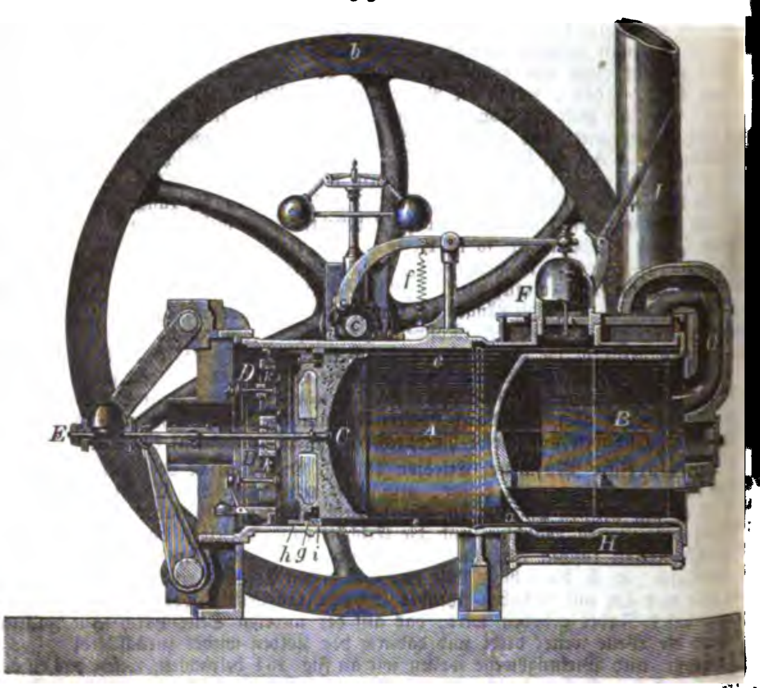
401

3. **Die calorische Maschine** (Ericsson 1850). Die calorische oder Heißluftmaschine wird durch die erhöhte Spannung heißer, atm. Luft getrieben. Die Constr., welche vor etwa 20 Jahren am meisten Eingang im Kleinbetriebe gefunden hatte, aber wegen der durch die Erhitzung der ganzen Maschine und die Erschütterung derselben durch die gewaltigen Ventilschläge bewirkten raschen Abnutzung meist wieder in Abgang kam, ist eine einfachwirkende Kolbenmasch.; d. h. die erhitzte Luft treibt in einem Cylinder einen Kolben vorwärts, der eine Welle und ein auf derselben sitzendes Schwungrad dreht, wodurch ein einseitiges Uebergewicht dieses Rades gehoben wird, das auf der anderen Seite durch seine Fallkraft das Rad und die Welle weiter dreht und dadurch den Kolben wieder zurückschiebt.

Die Constr. und Wirkungsweise wollen wir an Fig. 254 betrachten, welche das Innere des Cylinders und den Kolben durch einen Schnitt darstellt. Der Cyl. A enthält die Feuerbüchse B, aus welcher die Flammengase durch G in einen rings um den Cyl. gehenden Hohlraum H streichen und dann durch den Schornstein J entweichen. Am anderen Ende ist der Cyl. A offen, und in demselben sind 2 Kolben, der Speisekolben C, durch schlechte Wärmeleiter geschützt und einen langen Blechmantel ee tragend, und der Arbeitskolben D mit 2 Ventilen k. An dem Arbeitskolben sind 2 flache Kolbenstangen befestigt (in der Fig. nicht sichtbar), welche durch Kurbeln die Welle c und das Schwungrad b in Bewegung setzen und zu gleicher Zeit durch ein Hebelwerk die Stange EC und den Speisekolben C so bewegen, daß derselbe den doppelten Hub des Arbeitskolbens D macht und demselben bei Hub und Schub voraneilt; auch trägt der Arbeitskolben einen Ventilring g, der den Zwischenraum zwischen D und C von A abschließt, wenn er an den massiven Vorsprung h stößt, dagegen mit A verbindet, wenn er an den durchbrochenen Vorsprung i stößt, was abwechselnd stattfindet, je nachdem der Luftdruck von A her größer oder kleiner ist als von dem Zwischenraume CD her; ebenso öffnen sich die Ventile k des Arbeitskolbens bei einem Ueberdrucke von außen und schließen sich bei einem Ueberdrucke von innen, das Ventil F dagegen wird bei der Drehung der Welle c durch die auf derselben sitzende Nase d geöffnet und durch die Feder F geschlossen. — Wegen des Voreilens des Speisekolbens C beginnt dieser schon seinen Schub, wenn der Arbeitskolben D in dem letzten Stadium seines Hubes angelangt ist; ebenso bewegt sich C rascher voran als D; hierdurch vergrößert sich der

Zwischenraum CD, die Luft in demselben verdünnt sich, die Ventile k werden durch den äußeren Luftdruck geöffnet und es strömt Luft ein, das Ringventil aber wird durch den Druck der in A verdichteten Luft geschlossen; die heiße Luft in A strömt deswegen aus dem Blechmantel um den sehr wenig weiteren zweiten Blechmantel zwischen der Wand der Feuerbüchse und des Cyl. in dem engen Ringraume an und gibt ihre Hitze an diesen Mantel ab, bis sie endlich durch das rechtzeitige Oeffnen von F ausströmt. Während dessen gelangt der Speisekolben C an das Ende seines Schubes, sein Mantel e umgibt die Feuerbüchse und wird von dem zweiten Mantel umschlossen; in diesem Moment ist der Zwischenraum CD am größten, fängt aber sogleich an kleiner zu werden, weil C seinen Hub beginnt, während D in den letzten Stadien seines Schubes ist; es nähern sich daher C und D einander; dieses Nähern dauert auch während des ganzen Schubes beider Kolben fort, weil C sich rascher als D bewegt. Die Luft in dem Zwischenraume CD wird daher fortwährend ver-


Fig. 254.

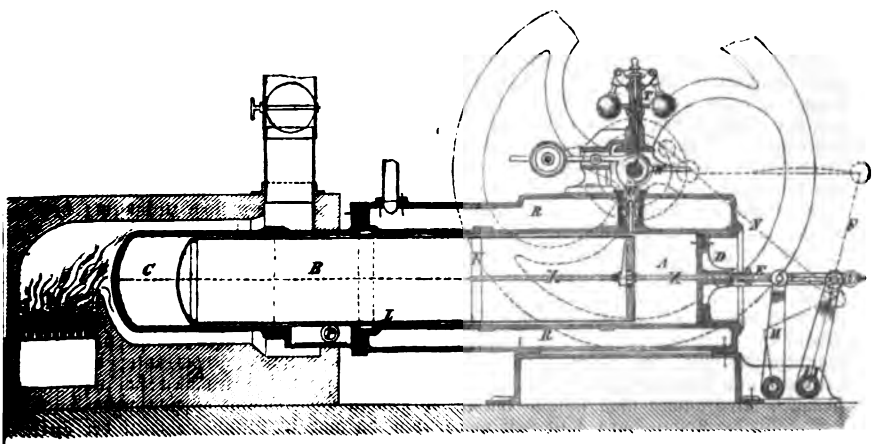


dichtet, die Ventile k schließen sich, das Ringventil g wird geöffnet, während das Ausström-ventil F geschlossen ist; folglich strömt die Luft aus dem Zwischenraume CD fortwährend in den Raum a zwischen die 2 Blechmäntel und dann nach A an der Feuerbüchse vorbei, wodurch sie erhitzt und spannkräftig wird, um das Zurückschieben der Kolben vollbringen zu können; denn ihre Spannung wirkt um die Blechmäntel herum und durch das Ring-ventil auch auf den Zwischenraum CD und so auf den Arbeitskolben D, während sich bei Verdichten der Luft in CD durch die Annäherung der Kolben an einander immer fortsetzt und so das Einströmen nach A zwischen den 2 Blechmänteln und der Feuerbüchse immer fortdauert, bis C wieder seinen Schub beginnt.

Wenn auch die Wasser- und Gasmotoren noch so sehr vervollkommnet und für die Kleinindustrie geeignet construirt werden, so sind doch die cal. Masch. unersetzlich für jene Orte oder Locale, wo es an Wasser und Gas fehlt. Es sind daher zahlreiche, neue oder veränderte Constr. erdacht worden, welche, wie die obige, jede Explosionsgefahr ausschließen und daher keiner Concession bedürfen, in welchen jedoch das Bestreben sichtbar ist, die Sicherheit und Leichtigkeit des Betriebes und der Wartung noch zu erhöhen und die Mängel der ersten Constr., die Erschütterungen der Ventilschläge und die abnützende Erhitzung der ganzen Masch. zu beseitigen. Die Lehmann'sche Heißluftmaschine (1870) ist in mehr als 1000 Exemplaren zu befriedigender Anwendung gekommen, verdient daher eine nähere Be-

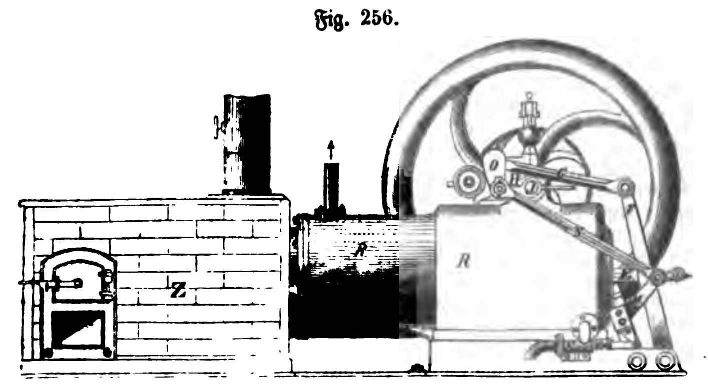
trachtung, wozu die Fig. 255 und 256 dienen sollen; erstere stellt einen Längendurchschnitt, letztere eine Seitenansicht der Maschine vor. Der Haupttheil der Masch. ist der gußeiserne Cyl. A, an den sich in gleicher Weite das Zwischenstück B und der Heiztopf C anschließen, welche beiden letzteren Theile in den Ofen Z eingemauert sind und durch die Feuerung so erhitzt werden, daß der Boden des Heiztopfes bis zur Rothgluth gebracht wird. Vorn rechts ist der Cyl. A offen und enthält den Arbeitskolben D, der mit einem nach innen gerichteten Lederstulp so abgedichtet ist, daß sich der Lederstulp bei einem äußeren Ueberdrucke öffnet und der äußeren Luft Zugang gestattet, bei einem inneren Ueberdrucke aber fest an die Cylinderwand schließt und der inneren Luft den Ausgang nicht gestattet. Es arbeitet daher die

Fig. 255.



Masch. fast immer mit derselben Luft, sie bedarf der Ein- und Auslaßventile nicht, wodurch die Ventilschläge wegfallen. Wie dieser große Vorzug der Masch. erreicht wird, ihr ruhiger, geräuschloser Gang, das kann allerdings erst aus den weiteren Constructionstheilen verstanden werden. An den Arbeitskolben D sind zwei Zugstangen E vorn und hinten befestigt und bewegen sich mit ihm hin und her; dadurch wird der gabelförmige Hebel F in wiegende Bewegung versetzt, die sich durch die Leitstange G und die Kurbel H in die drehende Bewegung der Maschinenwelle I und des schweren Schwungrades verwandelt. Durch die

Fig. 256.



Maschinenwelle wird nun eine zweite Kurbel, die Contrekurbel O in Drehung versetzt, wodurch mittels der Leitstange N und des Hebels M eine lange Kolbenstange X in hin- und hergehende Bewegung versetzt wird, welche Stange mitten durch den Arbeitskolben D vermittelst einer Stopfbüchse geht und mit einer festen Metallscheibe K endigt. Auf dieser Scheibe sitzt das wesentlichste Element der Masch., der Verdränger L, ein hohler, vollkommen geschlossener, sehr langer Blechcyl. von solcher Weite, daß zwischen ihm und der Cylinderwand nur eine dünne Luftschicht Raum hat. Derselbe wird durch die Kolbenstange X bewegt, von einzelnen

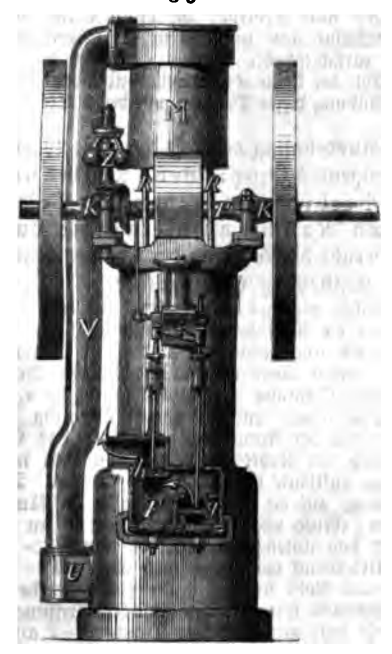
aufgenieteten Führungsstreifen an der Cylinderinnenwand gehalten und von der losen Rolle P' getragen. — Der Regulator T öffnet das Ventil U, das einzige Ventil an der Masch., wenn durch zu starke Feuerung oder durch verringerte Arbeit der Gang zu rasch wird, und läßt etwas Luft aus; auch dient dieses Ventil zum Abstellen der Masch., indem es mittels des Handhebels W geöffnet wird.

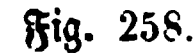
Auch die Lehmann'sche Heißluftmasch. ist eine einfach wirkende, offene cal. Masch., d. h. die Spannung der heißen Luft treibt den Arbeitskolben nur voran, während die Rückbewegung desselben durch die leb. Kft. des Schwungrades vollbracht wird, die auch die Bewegung des Verdrängers zu bewirken hat. Die Stellung der beiden Kurbeln, der Hebel und Stangen, sowie die Längen dieser Theile sind so gewählt, daß der Hub des Verdrängers eher beginnt und ca. 1½ mal so groß ist als der Hub des Arbeitskolbens. Wenn dieser noch nicht an dem Ende seines Voranganges angelangt ist, beginnt der Verdränger schon seinen Rückgang und treibt dadurch die heiße Luft im Heiztopfe C durch den schmalen Ringraum nach dem Raume A, so daß diese noch auf den Arbeitskolben D vorantreibend wirken kann. Der ganze Ringraum, wie auch der vordere Theil des Cyl. A ist jedoch von dem hohlen Mantel R umgeben, durch welchen fortwährend kaltes Wasser circulirt, das die heiße Luft abkühlt, so daß der Arbeitskolben D nur mit kalter Luft in Berührung kommt, der zweite Hauptvorzug dieser Masch. Der Rückgang des Verdrängers dauert noch fort und zwar wegen seines größeren Hubes mit größerer Geschw., wenn der Rückgang des Arbeitskolbens beginnt, bis fast alle heiße Luft aus dem Topfe C verdrängt und vor dem Verdränger angesammelt ist. Nun beginnt der Vorangang des Verdrängers, während der Kolben noch zurückgeht; bis der Kolben am Ende seines Rückganges angelangt ist, wird das ganze Vol. der vorhandenen Luft fast auf die Hälfte vermindert und dadurch die kalte Luft auf ihre doppelte Spannung comprimirt. Sie strömt daher durch den schmalen Ringraum in das sich immer mehr vergrößernde Vol. des Heiztopfes, wird dort erhitzt und durch die Erhitzung, obwohl sie sich bei der Einströmung ausgedehnt hat, auf ihrer hohen Spannung erhalten oder zu noch höherer Spannung gebracht. Der Heiztopf enthält daher ausgedehnte, aber erhitzte und daher spannkräftige Luft, der Raum A zwischen Verdränger und Kolben jedoch kalte, aber comprimirte und dadurch spannkräftige Luft. Obwohl diese zwei Luftmassen sich wegen des schmalen Ringraumes nicht mischen können, so gleichen sich doch ihre Spannungen aus; es wird daher der Kolben durch kalte Luft angetrieben, da auch die Leitungsfähigkeit der Luft zu geringfügig ist, um die Wärme durch den Ringraum fortpflanzen zu können. Demnach beginnt jetzt der Vorangang des Kolbens, Kolben und Verdränger gehen zusammen voran, der letztere aber wegen größeren Hubes schneller als der erstere, so daß die Compression der Luft in dem Raume A, ihr Strömen durch den Ringraum nach C, ihre Erhitzung und dadurch die eben geschilderte Wirkung fortdauert, bis der Verdränger seinen Rückgang wieder beginnt; hierbei dehnt sich, weil der Raum A jetzt vergrößert wird, sowie durch den Vorangang des Arbeitskolbens sich das ganze Luftvol. vergrößert, die Luft stark aus; die überwiegende Luftspannung nimmt daher fortwährend ab, bis sie dem äußeren Luftdrucke gleich ist, womit der Vorangang des Arbeitskolbens zu Ende ist. — Der Lehmann'sche Luftmotor wird in allen Größen bis zu 4e gebaut, und kann mit jedem Brennmaterial, selbst mit Gerbereiabfällen geheizt werden; die einpferdige Masch. erfordert bei 10stündiger Arbeitszeit durchschnittlich 1 Hectoliter Cokes. Ein Mangel derselben ist offenbar die Nothwendigkeit des Kühlwassers, der allerdings in Geschäften mit Warmwasserbedarf wegfällt.

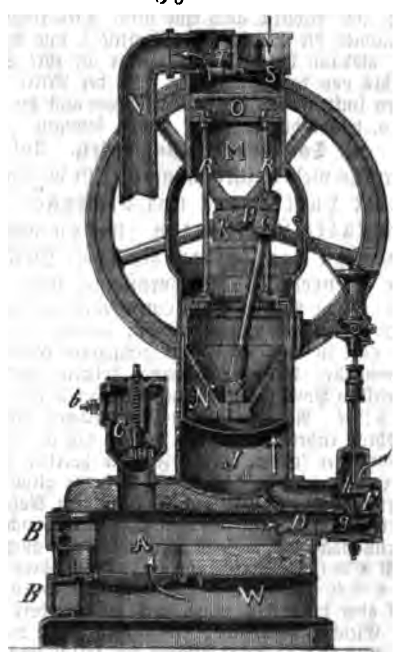
Der Hock'sche Sparmotor (1876). Den höchsten Grad der praktischen Anwendbarkeit und Billigkeit scheint der Sparmotor von Hock erreicht zu haben, da derselbe mit brennbaren Abfällen jeder Art erhitzt werden kann, z. B. an Cokesabfällen nur 3kg per Stunde und Pferdekraft verbraucht und daher bei täglich 10stündiger Arbeit höchstens 70 Pfennige Tageskosten macht. Außerdem nimmt derselbe so wenig Raum ein, daß er in jeder Zimmerecke Platz hat, theilt mit den besten Masch. dieser Art die Vorzüge leichtester In- und Außergangsetzung und Wartung, keines Dampfes, keines Kessels, keiner Fundamentirung, keiner behördlichen Erlaubniß zu bedürfen, unterscheidet sich vortheilhaft von dem Lehmann'schen Luftmotor dadurch, daß er keines Mauerwerks und keines Wassers bedarf und leicht transportirt werden kann, erreicht aber den fast geräuschlosen Gang dieser Masch. nicht; indessen ist das Geräusch doch verschwindend gegen das der älteren cal. Masch. und bei städtischem Tageslärm kaum in einem benachbarten Zimmer zu bemerken. Ein besonderer Vorzug ist der compacte und einfache Bau, die Abwesenheit weit ausgreifenden und verletzbaren Hebelwerks, wodurch die Reparaturbedürftigkeit auf ein Minimum reducirt wird. — Der Hock'sche Sparmotor ist auch eine einfach wirkende, offene cal. Masch. aber mit **innerer Feuerung**, d. h. die treibende Luft geht durch das Feuer selbst, erhält dasselbe, wird hierdurch und durch Mischung mit den Verbrennungsproducten auf den höchsten Hitzegrad gebracht, treibt dann den Kolben und wird ins Freie entlassen. Die Ursache der Billigkeit liegt in dieser inneren Feuerung, die jedoch schon Anfangs der 60er Jahre von Windhausen in Deutschland, Belou in Frankreich und Roper in Amerika angewendet wurde. Ueberhaupt ist der Hock'sche Motor

r Roper'schen Heißluftmasch. nachgebildet, unterscheidet sich jedoch von derselben durch seinen
ıfachen und compacten Bau, durch eine besser geschützte Einrichtung des Arbeitskolbens
ıd durch directe Uebereinandersetzung der drei Haupttheile. Die Fig. 257 und 258 geben
ıe Ansicht und einen aufrechten Längsschnitt des Hock'schen Motors. In der Ansicht ist
r unterste weiteste Theil der Ofen, der mittlere höhere, etwas engere Theil der Cylinder
ıd der oberste Theil M die Luftpumpe. Diese Anordnung der drei Haupttheile überein-
ıder, die auch aus dem Schnitte zu ersehen ist, ermöglichte den compacten Bau und den
orzug, daß der Kolben N, nachdem ihn die heiße Luft hinaufgetrieben hat, durch sein eige-
s Gewicht an seinem Hinabtreiben mitwirken kann. Die Luftpumpe M hat die Aufgabe,
ft aus der Atmosphäre anzusaugen, dieselbe zusammenzupressen und durch das Rohr V
den Ofen zu treiben. Zu diesem Zwecke steht ihr Kolben O durch eiserne Stangen R
it dem Arbeitskolben N in unveränderlicher Verbindung. Wenn dieser sinkt, so sinkt auch
r Luftpumpenkolben O, das Saugventil S öffnet sich und läßt Luft eintreten. Unter dem
ıftpumpenkolben O bei M geschieht hierbei nichts, ebenso wenig beim Aufgange desselben,

Fig. 257.




Fig. 258.



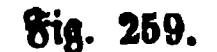
. die Luftpumpe unten, wie der Cylinder oben offen ist. Wenn der Arbeitskolben steigt,
steigt auch der Luftpumpenkolben, drückt die Luft über sich zusammen, wodurch das Saug-
ntil S geschlossen aber das Druckventil T geöffnet und die Luft durch das Rohr V in den
fen getrieben wird. Hierbei geht sie zuerst durch den Registerkasten U, in welchem ein
entil durch den Schwungkugelregulator Z so gestellt wird, daß bei zu schnellem Gange
eniger Luft, bei zu langsamem Gange mehr Luft in den Ofen eingelassen wird. Aus dem
egisterkasten gelangt die Luft in den Vorwärmer und Aschenkasten W und strömt durch die
oststäbe in den Feuerraum A. Derselbe ist mit Chamotte-Steinen ausgemauert und wäh-
nd des Ganges der Masch., wie der Aschenkasten durch die Thüren B hermetisch geschlossen.
ie Speisung des Feuers geschieht dann mittels des trichterartigen Füllkastens C. Derselbe
mit Brennmaterial gefüllt und unten durch den Druckkegel n von dem Feuerraume ge-
ieden. Wird dieser Druckkegel mittels der durch den Deckel gehenden Schraubenspindel
hoben, so sinkt der Brennstoff in den Feuerraum. Soll der Füllkasten nachgefüllt werden,
wird der Druckkegel niedergeschraubt und das Material durch die ebenfalls hermetisch ver-
ließbare Thüre b eingeschoben. Auf diese Weise ist jene Wirkung der inneren Feuerung
möglicht, daß die Verbrennungsluft zugleich die Treibluft ist, daß sie in dem Feuerraume
rdichtet und spannkräftig sein kann, ohne durch das Feuern u. s. w. entweichen zu können.

Demselben Zwecke müssen natürlich auch noch die Einrichtungen zum Weitergehen und Auslassen der Luft angepaßt sein. Die durch Compression und Erhitzung spannkräftige Luft strömt durch den Kanal D und das Einlaßventil g in den Cylinderraum J unter dem Arbeitskolben N, treibt denselben in die Höhe, ohne auf die verletzlichen Theile, die Lederdichtung am oberen Ende wirken zu können, weil sie von derselben durch den langen geschlossenen Blechmantel, der durch Fig. 258 deutlich wird, abgeschlossen ist. Durch das Steigen des Arbeitskolbens wird mittels der an demselben befestigten Schubstange Q die Kurbel P und die Hauptwelle K in Umdrehung versetzt, welche durch die 2 Schwungräder regulirt und durch deren leb. Kft. während des Kolbenrückganges weiter gedreht wird. Beim Beginne dieses Rückganges wird das Einlaßventil g geschlossen und das Auslaßventil h geöffnet, so daß die Luft in den Schornstein entweichen kann. Die Bewegung dieser zwei in dem Steuerkasten F sitzenden Steuerventile g und h geschieht von der Hauptwelle K aus. Diese setzt durch 2 gezahnte Stirnräder eine kleine Vorlegewelle in Drehung, die in unsere Fig. der Deutlichkeit wegen nicht aufgenommen wurde und auch zur Bewegung des Regulators Z dient. Auf dieser Vorlegewelle sitzt eine kleine Kurbel, welche das in Fig. 258 rechts von Q und in Fig. 257 links unten von R sichtbare Stängelchen in oscillirende Bewegung versetzt und dadurch auch eine kleine Steuerwelle hin- und herdreht, die durch vorspringende Daumen die Stangen der Ventile h und g abwechselnd und zur rechten Zeit niederdrückt, die alsdann durch Federn wieder in ihre Sitze zurückgeschoben werden. In Fig. 257 ist rechts von dem Buchstaben V in der Mitte des Cyl. die kleine Steuerwelle mit ihren Daumen links und rechts sichtbar, sowie auch die Verbindung dieser Daumen mit den 2 Stängchen, welche die Ventile g und h bewegen.

402 **4. Das Luftströmungsgesetz.** Auf der Ausdehnung der Luft durch die Wärme beruhen viele Luftströmungen. Für diese gilt folgendes Gesetz: **Wenn warme und kalte Lufträume mit einander in Verbindung stehen, so strömt die kalte Luft unten in den warmen Raum und die warme Luft oben in den kalten Raum.** Hierauf beruht die Wirkung der Lampenröhren, der Ofenrohre und Schornsteine, sowie die Entstehung vieler Winde.

Zum Beweise des Luftströmungsgesetzes denken wir uns in der Atm. ein verticales mit heißer Luft gefülltes Rohr; wegen ihrer durch die Ausdehnung geringeren Dichte ist die Luft in dem Rohre ein geringeres Gewicht l als jede gleich hohe und weite Luftsäule neben ihr; das Gewicht einer solchen Luftsäule, deren obere und untere Grundfläche in derselben Horizontalebene mit der oberen und unteren Oeffnung des Rohres liegen, sei s, so ist $s > l$. Auf den oberen Grundflächen dieser Säulen wie auf der oberen Oeffnung des Rohres ruhen Luftsäulen, die sich bis an die Grenzen der Atmosphäre erstrecken; das Gewicht einer solchen sei a. Folglich herrscht am Fuße des Rohres ein Druck von oben nach unten $P = a + l$ und am Fuße jeder gleich hohen Luftsäule der Druck $P' = a + s$. Der Druck P pflanzt sich von der unteren Rohröffnung auf die Grundflächen aller Luftsäulen fort und wirkt auf dieselben von unten nach oben; ebenso pflanzt sich der Druck P' an die Grundfläche des Rohres fort und wirkt auch dort von unten nach oben; da nun $P' > P$, weil $s > l$, so herrscht am Fuße des Rohres ein Ueberdruck von unten nach oben $= P' - P = s - l$; folglich muß die kalte Luft unten in das Rohr strömen. Dieser Druck pflanzt sich aber durch das Rohr auch an die obere Grundfläche fort, wo die sonstigen Pressungen im Gleichgewichte sind; daher fließt oben die heiße Luft mit demselben Drucke $s - l$ aus; die warme Luft steigt also in der kalten nach dem Gesetze des Auftriebes in die Höhe. Der Nachweis des Luftströmungsgesetzes ist leicht zu führen mit einem Lichte in der Thürspalte eines warmen Zimmers; oben biegt sich das Licht nach außen, unten nach innen, in der Mitte der Höhe bleibt es aufrecht. Die Strömung ist um so lebhafter, je größer die Druckdifferenz $s - l$ ist, je wärmer also die innere Luft im Vergleiche zu der äußeren und je höher das Rohr, die heiße Luftsäule ist. Der Zug in Oefen ist um so stärker, je kälter die äußere Luft ist, je stärker das Feuer brennt und je höher der Schornstein ist. Für sehr starke Feuer, für Dampfmaschinen u. dgl. sind daher sehr hohe Schornsteine nöthig; natürlich würde die Höhe ihren Werth verlieren, wenn die heiße Luftsäule sich oben abkühlen würde; Schornsteine bestehen daher häufig aus zwei getrennten Mauerschichten, die durch einen schlechten Wärmeleiter, wie Asche oder eine stagnirende Luftschicht von einander getrennt sind. Indessen ist die Abkühlung der Luft nach oben nicht ganz zu vermeiden, weshalb sich die Schornsteine nach oben verjüngen, und außerdem mehrt sich die Reibung mit der Höhe, wodurch bei einer gewissen Grenze der Vortheil weiterer Erhöhung schwindet. — In Gebirgsspalten, die nach oben und unten ausgehen, strömt unten kalte Luft aus. — Jede Feuersbrunst erzeugt sich selbst ihren Zug, ihren Wind. Jede ungleiche Erwärmung der Luft bringt Winde hervor; am Tage strömt unten die kältere Seeluft nach dem Lande zu (Seewind), in der Nacht vom kälteren Lande nach der wärmeren See (Landwind); in

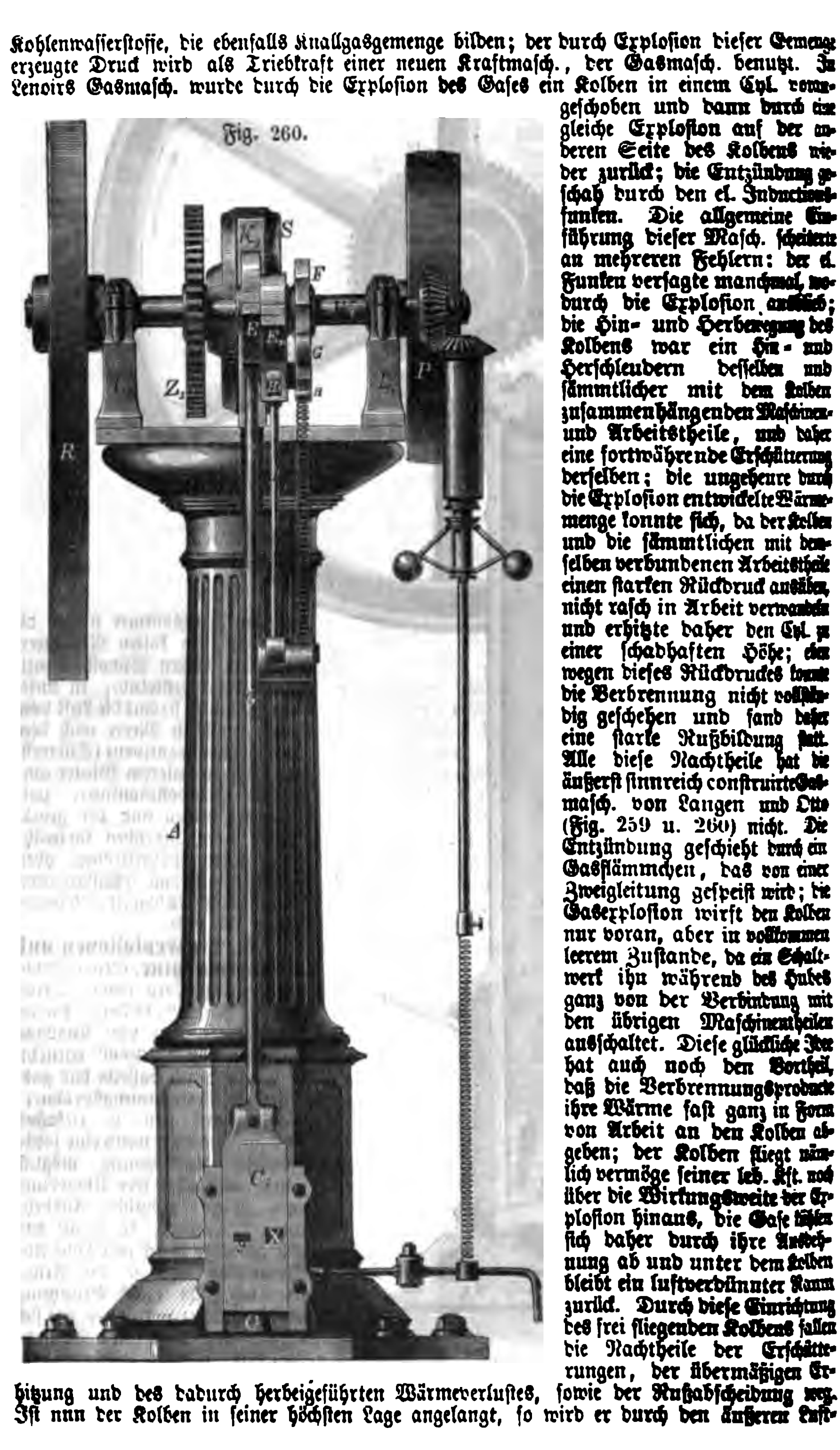
Fig. 259.



unserem Frühsommer strömt die Luft von dem kalten Nordmeere nach dem heißen Südost-Continente (Nordwestwind); in unserem Sommer strömt die Luft vom kalten indischen Meere nach dem heißen Südostcontinent (Südwestmonsun), in unserem Winter umgekehrt (Nordostmonsun); zwischen der heißen und der gemäßigten Zone herrschen fortwährend unten Polarströme, oben Aequatorialströme (Passatwinde, Nordost und Südwest; Näheres Physik der Luft).

403 5. **Die Explosionen und die Gasmaschine.** (Lenoir 1860, Langen und Otto 1865, Ottos „neuer Motor" 1878). Da bei der Verbrennung von Knallgas eine Hitze von 2—3000° entsteht, so würde durch dasselbe das gasförmige Verbrennungsproduct plötzlich auf sein 6—10faches Vol. ausgedehnt, wenn eine solche plötzliche Ausdehnung möglich wäre; weil aber jede Umgebung eine solche plötzliche Ausdehnung verhindert, so erhält das Gasgemenge durch jene Hitze eine Spannung von 6—10 Atm., wie auch leicht durch Benutzung der Formel $p = p_0 (1 + \alpha t)$ sich ergibt. Das wird durch Versuche Bunsens (1867) nachgewiesen, her den von einem explodirenden Knallgas ausgeübten Druck durch Gewichte maß, die albe noch eben zu lüpfen vermochte. Das Leuchtgas enthält außer Wasserstoff noch

Kohlenwasserstoffe, die ebenfalls Knallgasgemenge bilden; der durch Explosion dieser Gemenge erzeugte Druck wird als Triebkraft einer neuen Kraftmasch., der Gasmasch. benutzt. In Lenoirs Gasmasch. wurde durch die Explosion des Gases ein Kolben in einem Cyl. vorwärts geschoben und dann durch eine gleiche Explosion auf der anderen Seite des Kolbens wieder zurück; die Entzündung geschah durch den el. Inductionsfunken. Die allgemeine Einführung dieser Masch. scheiterte an mehreren Fehlern: der el. Funken versagte manchmal, wodurch die Explosion ausblieb; die Hin- und Herbewegung des Kolbens war ein Hin- und Herschleudern desselben und sämmtlicher mit dem Kolben zusammenhängenden Maschinen- und Arbeitstheile, und daher eine fortwährende Erschütterung derselben; die ungeheure durch die Explosion entwickelte Wärmemenge konnte sich, da der Kolben und die sämmtlichen mit demselben verbundenen Arbeitstheile einen starken Rückdruck ausüben, nicht rasch in Arbeit verwandeln und erhitzte daher den Cyl. zu einer schadhaften Höhe; eben wegen dieses Rückdruckes konnte die Verbrennung nicht vollständig geschehen und fand daher eine starke Rußbildung statt.


Fig. 260.

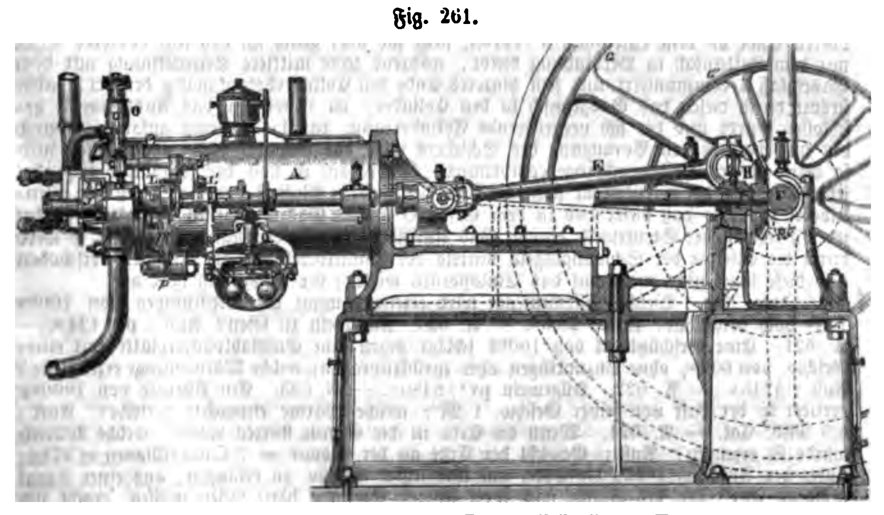
Alle diese Nachtheile hat die äußerst sinnreich construirte Gasmasch. von Langen und Otto (Fig. 259 u. 260) nicht. Die Entzündung geschieht durch ein Gasflämmchen, das von einer Zweigleitung gespeist wird; die Gasexplosion wirft den Kolben nur voran, aber in vollkommen leerem Zustande, da ein Schaltwerk ihn während des Hubes ganz von der Verbindung mit den übrigen Maschinentheilen ausschaltet. Diese glückliche Idee hat auch noch den Vortheil, daß die Verbrennungsproducte ihre Wärme fast ganz in Form von Arbeit an den Kolben abgeben; der Kolben fliegt nämlich vermöge seiner leb. Kft. noch über die Wirkungsweite der Explosion hinaus, die Gase kühlen sich daher durch ihre Ausdehnung ab und unter dem Kolben bleibt ein luftverdünnter Raum zurück. Durch diese Einrichtung des frei fliegenden Kolbens fallen die Nachtheile der Erschütterungen, der übermäßigen Erhitzung und des dadurch herbeigeführten Wärmeverlustes, sowie der Rußabscheidung weg. Ist nun der Kolben in seiner höchsten Lage angelangt, so wird er durch den äußeren Luft-

druck zurückgeschoben, nachdem das Schaltwerk ihn wieder mit den übrigen Theilen verkuppelt hat. Es werden daher diese Theile durch Luftdruck bewegt; der äußere Luftdruck ist die eigentliche Triebkraft der Masch., die daher von den Erfindern auch „atmosphärische Gaskraftmaschine" genannt wird.

Fast 10 Jahre lang beherrschte diese Masch. das Feld des Klein- u. Mittelbetriebes, da sie für Pferdekraft und Stunde nur 1cbm Gas erfordert; mehr als 4000 wurden in dieser Zeit gebaut und mit Vortheil benutzt. Indessen ist doch die verhältnißmäßig bedeutende Größe ein unverkennbarer Nachtheil, die feineren Detailconstr. möchten wohl bei längerem Gebrauche gelitten haben, und ein abscheuliches Geräusch trat unregelmäßig und erschreckend auf. In seinem „neuen Motor" beseitigte Otto diese Nachtheile, ohne eine Vermehrung des Gasverbrauchs, weßhalb dieser „Otto" seit den wenigen Jahren seiner Existenz in vielen Tausenden von Exemplaren durch die ganze civilisirte Welt verbreitet ist. Auf den großen Ausstellungen sieht man diese compakten und eleganten Maschinen geräuschlos ihre Arbeit verrichten, ohne daß sich Jemand um sie kümmert und ohne ihr schmuckes Aussehen zu verlieren. Die Verkleinerung der Dimensionen verdankt der Otto seiner Compression des Gases vor der Zündung, die außerdem wegen größerer Annäherung der Mol. die Zündung sicher macht, selbst bei geringerer Gasmenge, welche ihrerseits die Anfangstemp. und dadurch die nöthige Abkühlung mindert. Die Vermeidung complicirten Details z. B. des Schaltwerks wurde durch die directe Wirkung des explodirenden Gases auf den Kolben möglich; aber die Beseitigung der hiermit verbundenen Explosionsschäden, wie überhaupt der geschmeidige, geräuschlose Gang, durch die Einführung des todten Raumes im Cylinder; d. h. der Kolben geht bei seinem Rückgange nicht bis ans Ende des Cyl., sondern nur etwas über die Mitte hinaus; dadurch bleibt zwischen ihm und dem Boden des Cyl. das Gasgemisch der Verbrennungsproducte zurück und bildet zwischen der Explosion und dem Kolben ein elastisches Polster, das den Stoß unschädlich macht. Gerade aber durch die Berührung des Gasgemenges und der Luft mit den Verbrennungsproducten verbrennt dasselbe langsamer und während des ganzen Kolbenvorganges, so daß die Gewalt der Explosion sich auf den ganzen Vorangang vertheilt, also von ihrer Heftigkeit befreit und doch ganz ausgenutzt wird, eine große Kolbengeschw. erzielt. Damit jedoch die 4 Vorgänge des Otto, Gas- und Luftansaugung, Compression, Zündung und Explosion, Austreibung der Verbrennungsproducte bewirkt werden können, ist ein Schwungrad nöthig, das die leb. Kft. des Kolbenvorganges aufsammelt, durch dieselbe den Kolben rückwärts und so die Verbrennungsproducte austreibt, aber auch den Kolben noch einmal voranbewegt, wobei er das Gas ansaugt, und noch einmal zurück, damit er dasselbe comprimire. Die Masch. ist also nicht doppeltwirkend, wie Lenoirs, und nicht einfach wirkend, wie Langen-Ottos, sondern halbwirkend; nach 2 Kolbenspielen erfolgt eine Wirkung.

Die Fig. 261 stellt den Otto in der Seitenansicht und Fig. 262 im Grundriß mit Cylinderachsenschnitt vor. Auf den Laien macht der Otto mit seinen horizontal angeord-

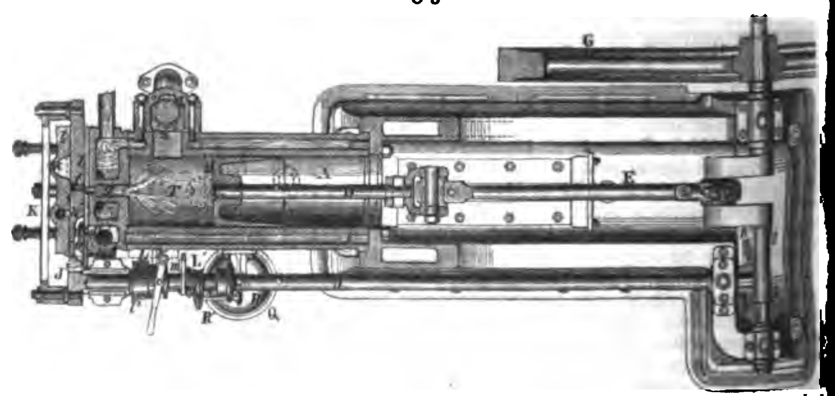
Fig. 261.



neten Haupttheilen, Cylinder A, Kolbenstange D und Pläuelstange E den Eindruck einer liegenden Dampfmaschine, der noch durch die verkröpfte Welle F, das Schwundrad G und die

Riemenscheibe G′ verstärkt wird. Der Cylinder ist, wie der Grundriß zeigt, vorn, d. i. links offen, sonst überall von Kühlwasser umgeben, und hinten der Boden hat die Einlaßöffnung g für das Gasgemisch und den Auslaß m^2 für die Verbrennungsproducte, zwischen dem Boden und dem Kolben D ist der todte Raum T; der Kolben ist also in seiner äußersten Stellung links, am Beginne des Voranganges abgebildet. Außerhalb des Bodens liegt sich fest an denselben der Schieber l mit seiner Zündöffnung f und seinem Mischkanal de; der Schieberdeckel t preßt durch Schrauben und Federn den Schieber an und enthält den Hohlraum k für die Zündflamme und den Kanal h für das Betriebgas. Der Schieber wird wagrecht hin und her bewegt durch die Steuerstange K, welche ihre Bewegung durch die Steuerkurbel J′ erhält; diese sitzt am Ende der Steuerwelle J, welche durch die 2 conischen Räder H und H′ von der Hauptwelle F in Umdrehung versetzt wird; da jedoch die Radien dieser 2 Räder sich wie 1 : 2 verhalten, so macht der Schieber während 2 Kolben-

Fig. 262.



spielen nur einen Hin- und Hergang. In der gezeichneten Stellung ist die gaserfüllte Zündöffnung f eben an der Zündflamme in k vorbeigegangen und theilt die Zündung dem Gase in g mit, wodurch die Explosion stattfindet und den Kolben vorantreibt. Während des ersten Kolbenrückganges drückt die Nase l_1 der Muffe L, die auf der Steuerwelle sitzt und sich mit dieser dreht, auf den Winkelhebel pp′ und öffnet dadurch das Auslaßventil in m^1, so daß der größte Theil der Brenngase hinausgetrieben wird. Vor dem zweiten Vorangange des Kolbens ist der Schieber zurückgegangen; dabei geht der Kanal de mit seinem oberen Ende an dem Lufteinlaß d^2 vorbei, stellt sich aber gleich so, daß sein vorderes Ende mit dem Lufteinlaß in Verbindung bleibt, während seine mittlere Seitenöffnung mit dem Gaseinlaß h communicirt und sein hinteres Ende den Cylinderbodenkanal g berührt; daher strömt durch diesen das Gasgemisch in den Cylinder, da inzwischen das Auslaßventil geschlossen wurde und der sich vergrößernde Cylinderraum das Luftgemenge ansaugt. Durch den nun beginnenden Vorangang des Schiebers wird das Gemisch völlig abgeschlossen und so beim zweiten Kolbenrückgange comprimirt. Interessant ist noch der Regulator RQ; bei jeder Drehung der Steuerwelle stößt die Nase der zweiten Muffe L′ einmal gegen den Winkelhebel mm′, so daß dieser das in dem Gefäß O sitzende Gaszuflußventil öffnet und so bei jeder Drehung der Steuerwelle einmal Gas einläßt; geht aber die Masch. zu schnell, so wird durch die Energie der Schwungkugeln mittels des Winkelhebels R′ die Muffe L′ verschoben und diese kann nicht mehr auf das Einlaßventil wirken; der Gaszufluß hört auf.

404

Aufg. 619. Welche Wärmemenge wird erzeugt, wenn ein Bleiklumpen von 10^{kg} 100^m hoch herabfällt? Aufl.: 23,6°. — A. 620. Allgemein zu lösen? Aufl.: $ph/424^c$. — A. 621. Eine Geschützkugel von 100^{kg} schlägt gegen eine Gußstahlpanzerplatte mit einer Geschw. von 600^m, ohne einzudringen oder zurückzuprallen; welche Wärmemenge erzeugt sie? Aufl.: 4245^c. — A. 622. Allgemein $pv^2/8480^c$. — A. 623. Ein Asteroid von 10^{kg} verliert in der Luft von seiner Geschw. 1 M.; welche Wärme entwickelt derselbe? Aufl.: 6,5 Mill. Cal. — A. 624. Wenn die Erde in die Sonne stürzen würde, welche Wärme würde sie erzeugen? Aufl.: Gewicht der Erde an der Sonne = 7 Quadrillionen × 27^{kg}; unter der Annahme, daß die Erde, um ihre jetzige Geschw. zu erlangen, aus einer 3mal größeren Entf. von der Sonne nach ihrer jetzigen Stellung hätte fallen müssen, ergibt sich die Wärmemenge = 270 000 Quintillionen Cal., eine Wärme, welche für 93 Jahre Sonnenstrahlung ausreicht. — A. 625. Welche Wärme erzeugt die Verbrennung von 10^{kg} Kohlen-

stoff? Aufl.: 80 000°. — A. 626. Wenn Leuchtgas per 1^{kg} 6000° entwickelt, welche Arbeit könnte dann bei vollkommener Ausnutzung 1^{kg} Leuchtgas erzeugen? Aufl.: 2544000^{mk}. A. 627. Welche Arbeit 1^{kg} Steinkohle, wenn deren Verbrennungswärme = 7500°? Aufl.: 3180000^{mk}. — A. 628. Wenn eine Dampfmasch. zur Erzeugung von 1° in jeder St. 9^{kg} Steinkohle verbraucht, wieviel % der Wärmekraft werden dann zur Arbeit? Aufl.: 9^{kg} geben in 1 St. 67 500°, in 1 Sec. 18° = 7632^{mk}; es entstehen aber nur 75^{mk}, also noch nicht 1% Leistung. — A. 629. Die Langen-Otto'sche Gasmasch. verzehrt für 1° in 1 St. $0{,}8^{kg}$ Gas; wieviel % leistet sie? Aufl.: 13%. — A. 630. Wie groß ist die Verbrennungstemp. des reinen Kohlenstoffs, wenn die specifische Wärme des Kohlendioxyds = 0,2 ist? Aufl.: 1^{kg} C bildet $3^2/_3{}^{kg}$ CO^2, und 8000°; daher enthält 1^{kg} CO^2 2200°; hieraus die Verbrennungstemp. = 11000°. — A. 631. Eine Eisenbahnschiene ist bei 0° C. 3^m lang; wie lang ist sie bei 30° C? Aufl.: 3^m 1^{mm}. — A. 632. Wie lang ist ein Körper bei t^0, wenn seine Länge bei $0^0 = l$ und sein Ausd.-Coëff. = α ist? Aufl.: $l' = l(1 + \alpha t)$. — A. 633. Eine Zinkstange ist bei 100° 334^{cm} lang; wie lang ist sie bei 0°? Aufl.: 333^{cm}. — A. 634. Wie lang ist ein Körper bei 0°, dessen Länge bei $t^0 = l'$ ist? Aufl.: $l = l'/(1 + \alpha t.)$ — A. 635. Zwei 10^m von einander entfernte Wände sind um 6^{cm} aus einander gewichen; man will sie durch die Zusammenziehung eines heißen Eisenankers wieder zurückführen; auf welche Temp. müssen die Eisenstangen vor der Verankerung erhitzt werden? Aufl.: 500°. — A. 636. Wie groß ist der Flächeninhalt einer Platte bei t^0, wenn bei 0° ihre Länge und Breite beziehentlich l und b sind? Aufl.: $f = lb(1 + \alpha t)^2 = lb(1 + 2\alpha t)$ annähernd. — A. 637. Wie groß ist eine Silberplatte bei 300°, wenn bei 0° ihre Länge und Breite 200^{mm} betragen? Aufl.: $404{,}8^{qcm}$. — A. 638. Der Ausd.-Coëff. von Sandstein ist 12 Milliontel; um wieviel dehnt sich ein Block von 1^{cbm} von — 10° bis 30° aus? Aufl.: 1440^{ccm}. — A. 639. Ein Glasgefäß hält bei 0° gerade 1^{cdm} Wasser; wieviel bei 100°? Aufl.: $1{,}0024^{cdm}$. — A. 640. Wenn der Ausd.-Coëff. des Holzes für 1° C 0,00000375 beträgt, wie groß ist derselbe für 1° R? Aufl.: 0,00000469. — A. 641. Welchen Raum nimmt 1^l Quecksilber von 0° bei 100° ein? Aufl.: $1018{,}2^{ccm}$. — A. 642. Wenn die Dichte des Quecksilbers bei 0° = 13,59 ist, wie groß ist dieselbe bei 200°? Aufl.: 13,11. — A. 643. Wie groß ist die Dichte eines Körpers bei t^0, wenn sie bei 0° = d ist? Aufl.: $d' = d/(1 + \alpha t)$. — A. 644. Wie groß ist der Barometerstand von 760^{mm} bei t^0 auf 0° reducirt? Aufl.: $h' = 760/(1 + 0{,}000182t)$, nahezu = $760(1 - {}^1/_{5555}t)$. — A. 645. Für 20° die genaue und die genäherte Rechnung auszuführen. Aufl.: 757,243 und 757,261. — A. 646. Wie groß ist der Ausd.-Coëff. des Quecksilbers für 1° R? Aufl.: $^1/_{4444}$. — A. 647. Wie groß ist das spec. Gew. einer Flüssigkeit bei 0°, wenn es bei $t^0 = s$ ist? Aufl.: $s' = s(1 + \alpha t)$. — A. 648. Wieviel Schw. macht ein bei 0° C l^m langes Pendel bei t^0 in 1 St.? Aufl.: $n = 3600/(\pi \sqrt{(l(1 + \alpha t)/g)})$. — A. 649. Wieviel Schw. macht ein messingenes Secundenpendel von $0{,}994^m$ Länge bei 0° per Tag weniger, wenn die Temp. 20° ist? Aufl.: Statt 86400 nur 86373, also 27 weniger; in 7 Tagen geht die Uhr um 3 Min. nach. — A. 650. Welchen Raum nimmt 1^l Gas von 0° bei 100° ein? Aufl.: $1366{,}5^{ccm}$. — A. 651. Welche Spannung hat eingesperrte Luft bei 200°? Aufl.: 1317^{mm} Quecksilber. — A. 652. Wenn die Dichte eines Gases bei 0° und 760^{mm} Luftdruck = d ist, wie groß ist sie beim Barometerstand h und der Temp. t? Aufl.: $d' = d(h/760)/(1 + \alpha t)$. — A. 653. Arago und Biot bestimmten 1806 die Dichte der Gase folgendermaßen: Ein Ballon gefüllt mit Luft beim Barometerstand H und der Temp. t wog P^{kg}, ausgepumpt bis zur Spannung h nur noch p^{kg}; mit Gas gefüllt bei der Spannung H' und der Temperatur t' aber P', wieder ausgepumpt noch p'. Die Dichte des Gases zu bestimmen.

$$\delta = \frac{(P' - p')(H - h)(1 + \beta t)(1 + \alpha' t')}{(P - p)(H' - h')(1 + \beta t')(1 + \alpha t)}$$

worin α, α' und β die Ausd.-Coëff. der Luft, des Gases und des Glases sind.

4. Zweite Hauptwirkung der Wärme.

Die Aggregatzustände.

Es gibt 4 Aggregatzustandsänderungen. 1. Uebergang eines Körpers aus dem festen in den flüssigen Zustand, die Schmelzung. 2. Uebergang eines Körpers aus dem flüssigen in den festen Zustand, die Erstarrung. 3. Uebergang eines flüssigen Körpers in den luftförmigen Zustand, die Verdampfung. 4. Uebergang eines luftförmigen Körpers in den flüssigen Zustand, die Condensation. 405

1. Die Schmelzung. Damit ein fester Körper in den flüssigen Zustand über-

gehe, ist eine bestimmte Temperatur desselben nöthig, die man **Schmelzpunkt** nennt; außerdem muß demselben während des Schmelzens eine gewisse Menge von Wärme zugeführt werden, die durch das Schmelzen verbraucht wird, ohne die Temperatur des schmelzenden Körpers zu erhöhen, und die man **Schmelzwärme** (früher latente oder gebundene Wärme) nennt.

Um nämlich einen Körper zu schmelzen, müssen die Mol. desselben so weit auseinander getrieben werden, daß die Anziehung derselben gegen einander nahezu gleich Null ist; dieses Auseinandertreiben ist eine Arbeit, welche von der leb. Kft. der Mol. geleistet werden muß. Wenn aber durch irgend eine Kraft eine Arbeit geleistet werden soll, so muß diese Kraft eine gewisse Höhe erreichen; z. B. wenn wir einen schweren Stein auf einer Unterlage fortschieben wollen und mit einer zu geringen Anstrengung der Muskeln an die Arbeit gehen, so sind wir genöthigt, unsere Anstrengung immer mehr zu verstärken, bis sie endlich die zur Ueberwindung der Reibung nöthige Höhe erreicht; dann erst kann die Muskelanstrengung die Arbeit leisten, und durch die Reibung wird alle Arbeit der Muskelanstrengung aufgezehrt; während aber die Muskelanstrengung diese Arbeit vollbringt, ist keine Steigerung derselben nothwendig, ja nicht einmal möglich (Axiom 5). — Ebenso muß auch, um das Auseinandertreiben der Mol. vollbringen zu können, die leb. Kft. der Mol., d. i. die Temp. bis zu einer gewissen Höhe gesteigert werden, bis ihr Druck endlich dem Widerstande, den die Molekularanziehung hervorruft, gewachsen ist. Diese Temp. ist der Schmelzpunkt. Ist diese Temp. erreicht, so ist damit die Arbeit des Auseinandertreibens noch nicht geleistet, sie muß erst noch geleistet werden, und durch die Arbeitsleistung wird die leb. Kft., d. i. Wärme verzehrt; diese verzehrte Wärme ist die Schmelzwärme. Während dieser Leistung aber ist eine Steigerung der leb. Kft. nicht nothwendig, ja nicht einmal möglich; denn die auseinandertreibende Kraft und die auseinandertreibende Bewegung sind hier congruent, das Auseinandertreiben geschieht dadurch, daß jede unendlich kleine Steigerung der Bewegung sofort die Mol. noch weiter von einander entfernt und sich dadurch in Arbeit verwandelt; es wird also während des Schmelzens alle zugeführte Wärme zur Arbeit, nicht aber zur Steigerung der Temp. verwendet. Die Schmelzwärme wird verzehrt, ohne die Temp. zu erhöhen; während des Schmelzens ändert sich trotz Wärmezufuhr die Temp. des schmelzenden Körpers nicht: Der Schmelzpunkt ist constant. — Nach dieser Erklärung der Schmelzerscheinungen müßte jede Schmelzung mit einer Ausdehnung verbunden sein; dies ist auch meistens der Fall. Ausnahmen finden sich bei einigen krystallinischen Körpern, wie Eis, Wismuth, die sich beim Schmelzen zusammenziehen und umgekehrt beim Erstarren ausdehnen. Dies kommt aber einfach davon her, daß die krystallinischen Körper aus kleinen Krystallen, Krystallkeimen, in solcher Weise zusammengestellt sind, daß diese durch ihre eigenthümliche Form bei der Zusammenstellung zahlreiche Lücken bilden; diese Lücken werden beim Schmelzen wegen der absolut leichten Verschiebbarkeit der Mol. im flüssigen Zustande ausgefüllt und bewirken daher trotz des größeren Raumes, den jeder zerfallende Krystallkeim ausfüllt, eine Verkleinerung des Volumens.

406 a. **Der Schmelzpunkt** (Deluc 1790) ist bei einem und demselben Körper constant und bei verschiedenen Körpern verschieden, da die bei der Schmelzung zu überwindende Anziehung bei verschiedenen Körpern verschieden ist. Bei vielen Körpern liegt er innerhalb der durch gewöhnliche Mittel erreichbaren Temperaturen, manche, wie Platin, Quarz, Kalk, sind erst im Knallgasgebläse, andere, wie Silicium, Titan, Magnesia erst durch den stärksten elektrischen Strom schmelzbar, manche, wie Kohle, zeigen auch dann nur ein leichtes Anschmelzen, andere, wie Osmium, sind ganz unschmelzbar. Viele Körper sind bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, haben also ihren Schmelzpunkt nahe bei oder unter 0°; viele Gase sind noch nicht im festen Zustande dargestellt worden, ihr fester Zustand hat also einen unbekannten Schmelzpunkt tief unter 0°. — Der Schmelzpunkt wird durch Erhöhung des äußeren Druckes erhöht, aber nur um wenig. — Die Legirungen haben einen niedrigeren Schmelzpunkt als das arithmetische Mittel ihrer Bestandtheile, ja er liegt meist sogar niedriger als die Schmelzpunkte der Bestandtheile.

Die Unveränderlichkeit der Schmelztemp. zeigt besonders schön der Versuch für die Bestimmung des Gefrierpunktes am Thermometer (s. 399.). — **Despretz** bedurfte zum Erweichen und Krümmen eines Stückchens Kohle im stickstofferfüllten Raume einer Batterie von 500—600 Bunsen'schen Elementen, Magnesia schmilzt mit 187 Elementen, Iridium, Rhodium, Thonerde und andere strengflüssige Erden schmelzen im Knallgasgebläse.

Iridium	2200°	Tellur	400°	Phosphor	43°
Platin	1800—2200	Blei	325	Talg	40
Schmiedeeisen	1600	Cadmium	300	Butter	32
Stahl	1400	Wismuth	265	Rüböl	1
Gußeisen	1200	Zinn	220	Eis	0
Gold	1075	Selen	217	Terpentinöl	—27
Kupfer	1050	Schwefel	111	Quecksilber	—39
Silber	954	Jod	107	Kohlendioxyd	—58
Aluminium	800	Natrium	90	Ammoniak	—75
Magnesium	750	Stearin	70	Schwefelwasserstoff	—86
Arsen	500	Wachs	68	Stickoxydul	—100
Zink	420	Wallrath	47		

J. Thomson und Clausius (1850) schlossen die Erhöhung des Schmelzpunktes durch Vergrößerung des äußeren Druckes aus der mechanischen Wärmetheorie. Alle Körper nämlich, die sich beim Schmelzen ausdehnen, haben dabei eine äußere Arbeit zu vollbringen, nämlich den Luftdruck um den Betrag der Ausdehnung zurück zu schieben; wird dieser äußere Druck größer, so wird die Fähigkeit, denselben zu überwinden, erst durch Erhöhung der leb. Kft. erreicht, und diese erhöhte leb. Kft. muß dann auch eine größere Arbeit leisten; es wird also sowohl der Schmelzpunkt als auch die Schmelzwärme durch Druck erhöht. Für den Schmelzpunkt haben Bunsen und Hopkins diese Folgerung richtig befunden. Bunsen fand, daß Wallrath unter 1^{at} bei 18°, unter 156^{at} bei 51° schmelze. Hopkins fand für 519^{at} 60°, für 792^{at} 80°; der Schmelzpunkt des Schwefels war bei diesen Pressungen 135° und 141°. — Dieses Eintreffen von theoretisch gefundenen Eigenschaften ist eine wesentliche Stütze der mechanischen Wärmetheorie. Noch glänzender aber bewährte sich dieselbe bei dem Wasser. J. Thomson und Clausius folgerten nämlich aus dem Zusammenziehen des Eises beim Schmelzen ein umgekehrtes Verhalten für dasselbe, nämlich eine Erniedrigung des Schmelzpunktes durch den Druck und berechneten diese Erniedrigung sogar, für 1^{at} $^1/_{144}$°. Schmelzendes Eis hat nämlich nicht blos keine äußere Arbeit zu leisten, sondern es nimmt im Gegentheile äußere Arbeit auf, die in Wärme verwandelt eine geringere Wärmezufuhr nöthig macht; der äußere Druck wirkt eben dahin, wohin auch die innere Wärme wirkt, nämlich auf das Zerfallen der Krystallkeime. Da nun der äußere Druck hier in demselben Sinne wie die leb. Kft. der Mol., wie die Temp. wirkt, so ist bei erhöhtem Drucke eine geringere Temp. nothwendig. Indessen kann diese Erniedrigung, wie die vorhin betrachtete Erhöhung nur gering sein, weil die Molekularkräfte in festen Körpern gegen jeden äußeren Druck bedeutend überwiegen; die innere Arbeit ist viel größer als die äußere. Auch diese Folgerungen aus der Theorie wurden bewährt. W. Thomson stellte ein äußerst empfindliches Aetherthem. in eine Mischung von Eis und Wasser und fand beim Zusammenpressen durch 8^{at} ein Fallen um 7,5°, durch 17^{at} um 16,5, was eine Erniedrigung des Schmelzpunktes um 0,0575 und 0,1287° C. am gewöhnlichen Therm. anzeigt; der Gefrierpunkt des Wassers wird also durch 1^{at} um 0,0075° erniedrigt. Entsprechend zeigte Mousson (1858), daß comprimirtes Wasser erst bei niedrigeren Temp. gefriere; bei 13000^{at} erst bei — 18°, und daß umgekehrt Eis unter 0° durch Zusammenpressen flüssig werde.

Für die Erniedrigung des Schmelzpunktes der Legirungen, welche sich nach Matthiessen durch die geringere Anziehung verschiedenartiger Mol. gegen einander erklärt, sprechen zahlreiche Versuche. Eine Legirung von 1 Zinn und 6 Blei schmilzt bei 270°, 1 Z. und 2 B. bei 227°, 1 Z. und 1 B. bei 189°, 2 Z. und 1 B. bei 171°, 3 Z. und 1 B. bei 180°, 6 Z. und 1 B. bei 194°; 1 Wismuth, 1 Blei und 1 Zinn bei 125°; 8 Wismuth, 8 Zinn und 3 Blei (Rose'sches Metall) bei 94,5°; 8 Wismuth, 2 Cadmium, 2 Zinn und 4 Blei (Woods Legirung) bei 65—71°; die Legirung von Lipowitz (15 Bi, 4 Sn, 8 Pb, 3 Cd) schmilzt bei 60°. Auch Gemische von fetten Säuren und Salzen zeigen diese Erniedrigung. Stahl ist leichter schmelzbar als Eisen, obwohl er den fast unschmelzbaren Kohlenstoff enthält; die Flußmittel und Zuschläge beim Erzschmelzen sind oft für sich nur im Knallgasgebläse schmelzbar; reine Metalle erhalten für die leichtere Schmelzbarkeit einen Zusatz; Platintiegel durchlöchern an unreinen Stellen. Die Schmelzung der Legirungen beginnt gewöhnlich mit Erweichung, was man durch die Annahme erklärt, daß dieselben in 2 Partieen schmelzen, von denen die eine noch fest sei, während die andere schon den flüssigen Zustand besitze. Indessen gehen auch andere Stoffe, besonders die amorphen Kolloide häufig durch den weichen Zustand in den flüssigen über, dem entsprechend die Schmelzausdehnung mancher Stoffe, wie nach Kopp Wachs und Schwefel, allmälig erfolgt. Krystalloide werden beim Schmelzen gewöhnlich sogleich leichtflüssig und zeigen daher plötzliche Schmelzausdehnung; in dem Moment, wo das Zerfallen der Krystallkeime erreicht ist, sind auch die Mol. überhaupt von der Anziehung befreit. — Allotrope Modificationen können verschiedene Schmelzpunkte haben, weil ihnen eine verschiedene Molekularlagerung und daher eine verschiedene innere Anziehung entspricht; so ist der Schmelzpunkt des amorphen Phosphors 252°,

des gewöhnlichen 43°. Schwefel und Selen haben diese Eigenschaft nicht, weil die amorphen Modificationen derselben bei 100° sich plötzlich in die gewöhnlichen verwandeln.

Nach Lothar Meyer hängt der Schmelzpunkt der Elemente von dem Atomgewicht, speciell von dem Atomvolumen ab; die leichtschmelzbaren stehen auf den steigenden, die schwerschmelzbaren auf den fallenden Aesten der Curve des Atomvol.; leicht schmelzbar sind die Elemente, deren Atomvol. größer ist als das des El. mit nächst kleinerem Atomgewicht und umgekehrt. In den einzelnen Gruppen sinkt der Schmelzp. mit wachsendem Atomgew., z. B. Li, Na, K, Rb und Cs, auch Be, Mg, Ca, Sr, Ba u. s. w.; auch in manchen Gruppen chemischer Verbindungen gilt dieses Gesetz, z. B. in den Verbindungen der Halogene mit den Metallen der Alkalien und der alkalischen Erden (Carnelley 1876—79), für die Reihe der Fette (Mills 1882). Ueber den Zusammenhang des Schmelzp. mit dem Ausd.-Coeff. ist schon berichtet (396.).

407 b. **Die Schmelzwärme** (Black 1775) ist die Wärme, welche einem festen Körper, der den Schmelzpunkt erreicht hat, noch zugeführt werden muß, um denselben in Flüssigkeit von derselben Temperatur zu verwandeln. Sie beträgt z. B. für Eis ca. 80°; d. h. um 1kg Eis von 0° in 1kg Wasser von 0° zu verwandeln, sind 80° nöthig, d. i. so viel Wärme, daß man mit derselben 1kg Wasser um 80° erwärmen könnte. Weil diese Wärme in einen Körper aufgenommen wird, ohne dessen Temperatur zu erhöhen, so nannte man sie zur Zeit der Herrschaft des Wärmestoffes gebundene oder latente Wärme.

Mengt man 1kg fein zerstoßenes Eis von 0° mit 1kg Wasser von 80°, so entstehen 2kg Wasser von 0°; es sind also durch das Schmelzen von 1kg Eis dem 1kg Wasser 80° entzogen worden. Zuerst genau bestimmt wurde die Schmelzwärme des Eises von de la Prevostaye und Desains (1834), indem dieselben in einer gewogenen Wassermenge m von genau bestimmter Temp. t ein Stück Eis schmolzen, um das Gewicht M des geschmolzenen Eises zu finden, und dann ebenso genau die Temp. T nach der Vollendung des Schmelzens maßen. Ist nun die Schmelzwärme = x, so empfing das Eis die Wärmemenge $M(x+T)$; das Wasser aber verlor die Wärme $m(t-T)$; daraus folgt die Gleichung $M(x+T) = m(t-T)$, wonach x leicht zu finden. Auch Regnault (1844) und Person (1848) fanden nach ähnlichen Methoden und nach Anbringen aller Correcturen dieselbe Zahl 80°. Person bestimmte auch noch die Schmelzwärme anderer Stoffe: Phosphor 5, Schwefel 9, Natronsalpeter 63, Zinn 14, Wismuth 13, Blei 5, Zink 28, Silber 11, Quecksilber 3°; Violle fand (1877) für Platin 27.

Auch bei jeder anderen Ueberführung eines festen Körpers in den flüssigen Zustand wird Wärme verbraucht, so bei den Lösungen. Wirft man fein gepulvertes Salz in Wasser und rührt dasselbe mit dem Therm. um, so bemerkt man bald das Fallen desselben; besonders auffällig wirkt auch hier wieder die Thermosäule. Der Wärmeverbrauch ist um so größer, in je mehr Wasser das Salz gelöst wird, weil die verdünntere Lösung ein weiteres Auseinandergehen der Theilchen, eine größere Disgregationsvermehrung nöthig macht. Es ist nach Person (1848) die Lösungswärme von Kochsalz = 11, 13 oder 23°, je nachdem die Wassermenge zu der Salzmenge das Verhältniß 4, 7, 15 hat; bei Natriumsalpeter ist die Lösungswärme 36, 48, 60°, wenn 2, 5, 20mal soviel Wasser als Salz in der Mischung enthalten ist. Indessen nimmt hier die verbrauchte Lösungswärme in viel geringerem Maße zu als die Menge des Lösungsmittels; hieraus folgt, daß die Temperatur-Erniedrigung einer Lösung um so größer wird, je gesättigter dieselbe ist. Diese auch der Theorie entsprechende Folgerung wurde durch Versuche Rüdorffs (1869) bestätigt. Derselbe mischte Wasser mit einer etwas größeren Menge fein gepulverter Salze, als zur Sättigung nöthig war, damit dieselbe möglichst rasch stattfinde, und fand dann die Temperatur-Erniedrigung für Kochsalz 2,5, Chlorkalium 12,6, Salmiak 18,4, für Jodkalium 22,5, für Chlorcalcium (kryst.) 23,2, für Ammoniumnitrat 27,2, für Rhodankalium 34,5. — Die starke Temp.-Erniedrigung solcher Lösungen wird verwendet zu **Kältemischungen**. Ein Gemisch von 3 Salmiak und 10 Wasser geht von 13° auf — 5°, ein Gemisch von 3 Rhodankalium mit 2 Wasser von 11 auf — 23° herab. Rührt man diese Mischung mit einem Reagensglas um, das halb mit Wasser gefüllt ist, so ist dieses nach 2 bis 3 Minuten in Eis verwandelt. Noch bedeutender wird in manchen Fällen die Abkühlung, wenn man statt Wasser Schnee oder gestoßenes Eis nimmt. Es bildet sich dann durch die Wirkung der bewegten Mol. auf einander eine Verbindung der beiden Stoffe, die der Lösung entspricht; da nun viele Lösungen einen viel niedrigeren Schmelzpunkt (s. 408.) als die Bestandtheile haben, so muß die feste Mischung flüssig werden; es wird deßhalb nicht blos Lösungswärme des Salzes, sondern auch Schmelzwärme des Wassers verbraucht und dadurch die Temp. viel mehr erniedrigt als bei Anwendung von Wasser. So erzeugt eine Mischung von 3 Schnee und 1 Kochsalz eine Kälte von — 21° (Fahrenheit erhielt — 17,7° und verlegte dahin seinen

stoff? Aufl.: 80 000^{c}. — A. 626. Wenn Leuchtgas per 1^{kg} 6000^{c} entwickelt, welche Arbeit könnte dann bei vollkommener Ausnutzung 1^{kg} Leuchtgas erzeugen? Aufl.: 2544 000^{mk}. A. 627. Welche Arbeit 1^{kg} Steinkohle, wenn deren Verbrennungswärme = 7500^{c}? Aufl.: 3 180 000^{mk}. — A. 628. Wenn eine Dampfmasch. zur Erzeugung von 1^{e} in jeder St. 9^{kg} Steinkohle verbraucht, wieviel % der Wärmekraft werden dann zur Arbeit? Aufl.: 9^{kg} geben in 1 St. 67 500^{c}, in 1 Sec. 18^{c} = 7632^{mk}; es entstehen aber nur 75^{mk}, also noch nicht 1% Leistung. — A. 629. Die Langen-Otto'sche Gasmasch. verzehrt für 1^{e} in 1 St. 0,8^{kg} Gas; wieviel % leistet sie? Aufl.: 13%. — A. 630. Wie groß ist die Verbrennungstemp. des reinen Kohlenstoffs, wenn die specifische Wärme des Kohlendioxyds = 0,2 ist? Aufl.: 1^{kg} C bildet $3^2/_3$^{kg} CO^2, und 8000^{c}; daher enthält 1^{kg} CO^2 2200^{c}; hieraus die Verbrennungstemp. = 11000°. — A. 631. Eine Eisenbahnschiene ist bei 0° C. 3^{m} lang; wie lang ist sie bei 30° C? Aufl.: 3^{m} 1^{mm}. — A. 632. Wie lang ist ein Körper bei t°, wenn seine Länge bei 0° = l und sein Ausd.-Coëff. = α ist? Aufl.: $l' = l(1 + \alpha t)$. — A. 633. Eine Zinkstange ist bei 100° 334^{cm} lang; wie lang ist sie bei 0°? Aufl.: 333^{cm}. — A. 634. Wie lang ist ein Körper bei 0°, dessen Länge bei t° = l' ist? Aufl.: $l = l' / (1 + \alpha t.)$ — A. 635. Zwei 10^{m} von einander entfernte Wände sind um 6^{cm} aus einander gewichen; man will sie durch die Zusammenziehung eines heißen Eisenankers wieder zurückführen; auf welche Temp. müssen die Eisenstangen vor der Verankerung erhitzt werden? Aufl.: 500°. — A. 636. Wie groß ist der Flächeninhalt einer Platte bei t°, wenn bei 0° ihre Länge und Breite beziehentlich l und b sind? Aufl.: $f = lb(1 + \alpha t)^2 = lb(1 + 2\alpha t)$ annähernd. — A. 637. Wie groß ist eine Silberplatte bei 300°, wenn bei 0° ihre Länge und Breite 200^{mm} betragen? Aufl.: 404,8^{qcm}. — A. 638. Der Ausd.-Coëff. von Sandstein ist 12 Milliontel; um wieviel dehnt sich ein Block von 1^{cbm} von — 10° bis 30° aus? Aufl.: 1440^{ccm}. — A. 639. Ein Glasgefäß hält bei 0° gerade 1^{cdm} Wasser; wieviel bei 100°? Aufl.: 1,0024^{cdm}. — A. 640. Wenn der Ausd.-Coëff. des Holzes für 1° C 0,00000375 beträgt, wie groß ist derselbe für 1° R? Aufl.: 0,00000469. — A. 641. Welchen Raum nimmt 1^{l} Quecksilber von 0° bei 100° ein? Aufl.: 1018,2^{ccm}. — A. 642. Wenn die Dichte des Quecksilbers bei 0° = 13,59 ist, wie groß ist dieselbe bei 200°? Aufl.: 13,11. — A. 643. Wie groß ist die Dichte eines Körpers bei t°, wenn sie bei 0° = d ist? Aufl.: $d' = d / (1 + \alpha t)$. — A. 644. Wie groß ist der Barometerstand von 760^{mm} bei t° auf 0° reducirt? Aufl.: $h' = 760 / (1 + 0{,}000182t)$, nahezu $= 760(1 - {}^1/_{5555}t)$. — A. 645. Für 20° die genaue und die genäherte Rechnung auszuführen. Aufl.: 757,243 und 757,261. — A. 646. Wie groß ist der Ausd.-Coëff. des Quecksilbers für 1° R? Aufl.: $^1/_{4444}$. — A. 647. Wie groß ist das spec. Gew. einer Flüssigkeit bei 0°, wenn es bei t° = s ist? Aufl.: $s' = s(1 + \alpha t)$. — A. 648. Wieviel Schw. macht ein bei 0° C l^{m} langes Pendel bei t° in 1 St.? Aufl.: $n = 3600 / (\pi \sqrt{(l(1 + \alpha t) / g)})$. — A. 649. Wieviel Schw. macht ein messingenes Secundenpendel von 0,994^{m} Länge bei 0° per Tag weniger, wenn die Temp. 20° ist? Aufl.: Statt 86400 nur 86373, also 27 weniger; in 7 Tagen geht die Uhr um 3 Min. nach. — A. 650. Welchen Raum nimmt 1^{l} Gas von 0° bei 100° ein? Aufl.: 1366,5^{ccm}. — A. 651. Welche Spannung hat eingesperrte Luft bei 200°? Aufl.: 1317^{mm} Quecksilber. — A. 652. Wenn die Dichte eines Gases bei 0° und 760^{mm} Luftdruck = d ist, wie groß ist sie beim Barometerstand h und der Temp. t? Aufl.: $d' = d(h / 760) / (1 + \alpha t)$. — A. 653. Arago und Biot bestimmten 1806 die Dichte der Gase folgendermaßen: Ein Ballon gefüllt mit Luft beim Barometerstand H und der Temp. t wog P^{kg}, ausgepumpt bis zur Spannung h nur noch p^{kg}; mit Gas gefüllt bei der Spannung H' und der Temperatur t' aber P', wieder ausgepumpt noch p'. Die Dichte des Gases zu bestimmen.

$$\delta = \frac{(P' - p')(H - h)(1 + \beta t)(1 + \alpha' t')}{(P - p)(H' - h')(1 + \beta t')(1 + \alpha t)}$$

worin α, α' und β die Ausd.-Coëff. der Luft, des Gases und des Glases sind.

4. Zweite Hauptwirkung der Wärme.

Die Aggregatzustände.

405 Es gibt 4 Aggregatzustandsänderungen. 1. Uebergang eines Körpers aus dem festen in den flüssigen Zustand, die Schmelzung. 2. Uebergang eines Körpers aus dem flüssigen in den festen Zustand, die Erstarrung. 3. Uebergang eines flüssigen Körpers in den luftförmigen Zustand, die Verdampfung. 4. Uebergang eines luftförmigen Körpers in den flüssigen Zustand, die Condensation.

1. Die Schmelzung. Damit ein fester Körper in den flüssigen Zustand über-

gehe, ist eine bestimmte Temperatur desselben nöthig, die man **Schmelzpunkt** nennt; außerdem muß demselben während des Schmelzens eine gewisse Menge von Wärme zugeführt werden, die durch das Schmelzen verbraucht wird, ohne die Temperatur des schmelzenden Körpers zu erhöhen, und die man **Schmelzwärme** (früher latente oder gebundene Wärme) nennt.

Um nämlich einen Körper zu schmelzen, müssen die Mol. desselben so weit aus einander getrieben werden, daß die Anziehung derselben gegen einander nahezu gleich Null ist; dieses Auseinandertreiben ist eine Arbeit, welche von der leb. Kft. der Mol. geleistet werden muß. Wenn aber durch irgend eine Kraft eine Arbeit geleistet werden soll, so muß diese Kraft eine gewisse Höhe erreichen; z. B. wenn wir einen schweren Stein auf einer Unterlage fortschieben wollen und mit einer zu geringen Anstrengung der Muskeln an die Arbeit gehen, so sind wir genöthigt, unsere Anstrengung immer mehr zu verstärken, bis sie endlich die zur Ueberwindung der Reibung nöthige Höhe erreicht; dann erst kann die Muskelanstrengung die Arbeit leisten, und durch die Reibung wird alle Arbeit der Muskelanstrengung aufgezehrt; während aber die Muskelanstrengung diese Arbeit vollbringt, ist keine Steigerung derselben nothwendig, ja nicht einmal möglich (Axiom 5). — Ebenso muß auch, um das Auseinandertreiben der Mol. vollbringen zu können, die leb. Kft. der Mol., d. i. die Temp. bis zu einer gewissen Höhe gesteigert werden, bis ihr Druck endlich dem Widerstande, den die Molekularanziehung hervorruft, gewachsen ist. Diese Temp. ist der Schmelzpunkt. Ist diese Temp. erreicht, so ist damit die Arbeit des Auseinandertreibens noch nicht geleistet, sie muß erst noch geleistet werden, und durch die Arbeitsleistung wird die leb. Kft., d. i. Wärme verzehrt; diese verzehrte Wärme ist die Schmelzwärme. Während dieser Leistung aber ist eine Steigerung der leb. Kft. nicht nothwendig, ja nicht einmal möglich; denn die auseinandertreibende Kraft und die auseinandertreibende Bewegung sind hier congruent, das Auseinandertreiben geschieht dadurch, daß jede unendlich kleine Steigerung der Bewegung sofort die Mol. noch weiter von einander entfernt und sich dadurch in Arbeit verwandelt; es wird also während des Schmelzens alle zugeführte Wärme zur Arbeit, nicht aber zur Steigerung der Temp. verwendet. Die Schmelzwärme wird verzehrt, ohne die Temp. zu erhöhen; während des Schmelzens ändert sich trotz Wärmezufuhr die Temp. des schmelzenden Körpers nicht: Der Schmelzpunkt ist constant. — Nach dieser Erklärung der Schmelzerscheinungen müßte jede Schmelzung mit einer Ausdehnung verbunden sein; dies ist auch meistens der Fall. Ausnahmen finden sich bei einigen krystallinischen Körpern, wie Eis, Wismuth, die sich beim Schmelzen zusammenziehen und umgekehrt beim Erstarren ausdehnen. Dies kommt aber einfach davon her, daß die krystallinischen Körper aus kleinen Krystallen, Krystallkeimen, in solcher Weise zusammengestellt sind, daß diese durch ihre eigenthümliche Form bei der Zusammenstellung zahlreiche Lücken bilden; diese Lücken werden beim Schmelzen wegen der absolut leichten Verschiebbarkeit der Mol. im flüssigen Zustande ausgefüllt und bewirken daher trotz des größeren Raumes, den jeder zerfallende Krystallkeim ausfüllt, eine Verkleinerung des Volumens.

406 a. **Der Schmelzpunkt** (Deluc 1790) ist bei einem und demselben Körper constant und bei verschiedenen Körpern verschieden, da die bei der Schmelzung zu überwindende Anziehung bei verschiedenen Körpern verschieden ist. Bei vielen Körpern liegt er innerhalb der durch gewöhnliche Mittel erreichbaren Temperaturen, manche, wie Platin, Quarz, Kalk, sind erst im Knallgasgebläse, andere, wie Silicium, Titan, Magnesia erst durch den stärksten elektrischen Strom schmelzbar, manche, wie Kohle, zeigen auch dann nur ein leichtes Anschmelzen, andere, wie Osmium, sind ganz unschmelzbar. Viele Körper sind bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, haben also ihren Schmelzpunkt nahe bei oder unter 0°; viele Gase sind noch nicht im festen Zustande dargestellt worden, ihr fester Zustand hat also einen unbekannten Schmelzpunkt tief unter 0°. — Der Schmelzpunkt wird durch Erhöhung des äußeren Druckes erhöht, aber nur um wenig. — Die Legirungen haben einen niedrigeren Schmelzpunkt als das arithmetische Mittel ihrer Bestandtheile, ja er liegt meist sogar niedriger als die Schmelzpunkte der Bestandtheile.

Die Unveränderlichkeit der Schmelztemp. zeigt besonders schön der Versuch für die Bestimmung des Gefrierpunktes am Thermometer (§. 399.). — Despretz bedurfte zum Erweichen und Krümmen eines Stückchens Kohle im stickstofferfüllten Raume einer Batterie von 500—600 Bunsen'schen Elementen, Magnesia schmilzt mit 187 Elementen, Iridium, Rhodium, Thonerde und andere strengflüssige Erden schmelzen im Knallgasgebläse.

verden können. Ganz in derselben Weise wird der Firnschnee der Alpenspitzen zu Gletscher-
is, das vermöge seiner Plasticität, die es der Regelation verdankt, die Thäler mit all ihren
Windungen, Verengungen und Erweiterungen erfüllt, ja sogar über steile Stellen zusammen-
ängend, wenn auch geborsten, hinübergeht, und, wenn es einen Sturz, einem Wasserfalle
hnlich erleidet, doch gleich unterhalb dieser Stelle wieder ein Ganzes bildet, wie der Fluß
nterhalb seines Falles (Gletschercascaden).

Ueber die Erklärung der Regelation besteht noch keine Einigkeit. Faraday hielt sie für
ine Contactwirkung des Eises, die in ähnlicher Weise stattfinde, wie ein sich zersetzender
Stoff seinen Zustand auf einen sehr nahen Stoff übertrage. Tyndall erklärt diese Contact-
virkung dadurch, daß mit der Berührung zweier Eisflächen das Flächenwasser ins Innere
es Eises eingeschlossen und dadurch die freie Beweglichkeit der flüssigen Moleküle gehemmt
verde. Schultz (1869) glaubt, das innere Wasser gefriere wegen Luftarmuth eher als äußeres
ufthaltiges Wasser. Helmholtz (1865) warf gegen solche Erklärungen die theoretische Schwie-
igkeit ein, daß durch das Gefrieren eine beträchtliche Quantität latenter Wärme frei werde,
eren Verschwinden durch jene Erklärungen unklar bleibe. Nun zeigte Pfaundler (1869),
aß bei der Berührung von Wasser und Eis sich zwar das Eisgewicht nicht ändern könne,
veil die Summe der leb. Kft. von Wasser- und Eiswärme dieselbe bleiben müsse, wohl
ber die Gestalt des Eises. Die fortschreitend bewegten Wassermol., die an das Eis schlagen,
önnen nämlich unverändert zurückgeworfen, können aber auch von den Eismol. festgehalten
verden, oder ihre Bewegung den Eismol. mittheilen und dieselben dadurch dem flüssigen Zu-
ande nahe bringen. Das Eis bietet nämlich dem Wasser wegen seines krystallinischen Zu-
andes Mol. der verschiedensten Beschaffenheit dar, Mol., welche mit mittlerer, solche, welche
nit großer, und solche, welche mit kleiner Kraft in ihrer Gleichgewichtslage verharren; diese
rei verschiedenen Zustände müssen auf die Wassermol. die drei genannten Wirkungen aus-
iben, es wird daher das Eis an einer Stelle unverändert bleiben, an anderen zu-, an an-
eren abnehmen. Daher können sich zwischen Eisflächen dünne, vereinigende Eisbrücken bil-
en. Pfaundler zeigte dies an einer in einem Glaskolben schwimmenden Eiskugel von nahezu
leicher Größe, welche, in schmelzenden Schnee getaucht, innen durch kugelkreisförmige Eis-
rücken an das Glas anfror. Hiermit ist die Regelation ohne Druck dargethan. Durch
rhöhten Druck, so geben alle Forscher zu, wird die Regelation bedeutend beschleunigt und
ermehrt nach der Thomson-Helmholtz'schen Erklärung: Durch den Druck wird der Schmelz-
unkt erniedrigt; schmelzendes Eis wird daher durch Druck kälter und bringt so das um-
iegende Wasser zum Gefrieren. Dieser Druckkälte des Eises ist offenbar die rasche Regelation
usammengepreßter Eisstücke, wie auch die Regelation der Gletscher zuzuschreiben; Helmholtz
ielt aber auch das Zusammenfrieren von blos genäherten Eisstücken für eine Folge capil-
aren Druckes, welche Annahme nach Pfaundlers Erklärung nicht mehr nöthig erscheint.

8. Die Verdampfung (Clausius 1857). Die Verdampfung eines Körpers **410**
indet sowohl an der Oberfläche als im Inneren desselben statt; das Verdampfen
n der Oberfläche nennt man Verdunsten, das Verdampfen im Inneren Sieden
der Kochen. Das Verdunsten geschieht bei jeder Temperatur; das Sieden aber
rst bei einer bestimmten Temperatur, welche hauptsächlich von der Natur der
Flüssigkeit und dem Drucke auf dieselbe abhängt, und welche man Siedepunkt nennt.
Außer der Erwärmung bis zum Siedepunkte ist zum Sieden, sowie auch zum Ver-
unsten, noch eine gewisse Wärmemenge nöthig, welche zur Verdampfung verbraucht
vird, und welche wir *Dampfwärme* nennen wollen.

Damit ein Körper luftförmig werde, muß die leb. Kft. der Mol. so vergrößert wer-
en, daß dieselben ganz aus dem Wirkungskreise der Anziehung der übrigen Mol. heraus-
reten. Zu diesem Zwecke müssen die Mol. weit von einander entfernt werden; es ist daher
ie Anziehung auf einem großen Wege zu überwinden. Wenn dieselbe nun auch im flüs-
igen Zustande nahezu gleich Null ist und während der Verdampfung immer noch kleiner
vird, so ist doch die Arbeit zur Ueberwindung der Anziehung beträchtlich, weil der Weg
roß ist, auf dem diese Ueberwindung geschehen muß. Außerdem ist gewöhnlich bei der Ver-
ampfung ein äußerer Druck, meistens der Luftdruck, zurück zu schieben, und zwar wegen
er bedeutenden Volumvergrößerung bei der Verdampfung auf einem ebenfalls großen Wege.
Endlich ist es möglich, worauf die abnormen Dampfdichten hinweisen, daß im festen Zu-
ande die Mol mehr At. enthalten als im flüssigen, und im flüssigen mehr als im luft-
örmigen, so daß also beim Schmelzen und Verdampfen die Mol. gespalten werden müssen,
vozu wegen der starken Atomanziehung viel Arbeit nöthig wäre. Es sind also bei der Ver-
ampfung zwei oder drei beträchtliche Arbeiten zu leisten, innere Arbeit, die Disgregations-
ermehrung, und äußere Arbeit, die Zurückschiebung des äußeren Druckes. Diese Arbeiten
nüssen von zugeführter Wärme geleistet werden; folglich wird bei der Verdampfung Wärme

Krystallkeimen verhindert wird; dieselbe Wirkung hat die Adhäsion in Capillarröhren, in welchen Wasser schon bis auf — 20° ohne zu erstarren abgekühlt wurde. Das Unterkühlen des Wassers erklärt die Bildung von Grundeis im süßen Wasser.

Wie feste Mischungen einen niedrigeren Schmelzpunkt, so haben flüssige Mischungen einen niedrigeren Erstarrungspunkt. Lösungen in Wasser gefrieren erst unter 0° und zwar um so tiefer unter 0°, je concentrirter sie sind. Nach Rüdorff (1861) ist die Erniedrigung dem Procentgehalte der Lösung proportional; mit 2% Kochsalz gefriert Wasser bei — 1,[illegible], mit 12% bei — 7,2°; doch muß bei diesem Gehalte das Krystallwasser mancher Salze mit gerechnet werden, woraus man schloß, daß manche Salze sich als wasserhaltige Salze [illegible]. Beim Erstarren von Salzlösungen gefriert reines Wasser als salzfreies Eis heraus; man macht deßhalb das Meerwasser durch Gefrierenlassen in abgeschlossenen Räumen concentrirter, um es dann zur Salzbereitung zu benutzen. Wenn eine gefrorene Salzlösung noch Salz enthält, so findet sich dasselbe als flüssige concentrirte Schicht zwischen salzfreien Eisblättern. — Der Gefrierpunkt des Meerwassers liegt bei — 2,2°; doch kann dasselbe selbst bei gewöhnlicher Bewegung tief unterkühlt werden, und erstarrt dann erst bei heftigster Bewegung oder bei Berührung mit festen Körpern, besonders mit Eis- oder Schneekörnern, und zwar mit solcher Raschheit, daß sich oft plötzlich das kurz vorher ganz eisfreie Meer in Eis verwandelt, aber wegen der Erstarrungswärme und wegen der übrig bleibenden concentrirten Lösung nur in einen Eisbrei. Sehr bedeutend ist im Meere auch die Bildung von Grundeis, weil das Meerwasser, abweichend vom reinen Wasser, seine größte Dichte erst etwa bei — 5° hat und daher durch und durch überschmelzen kann. In den nördlichen Meeren sieht man deßhalb an flachen Stellen den Boden ganz mit Eis bedeckt; doch ist die Grundeisbildung bis in 200′ Tiefe nachgewiesen. Ist im Winter allmälig das Meer bis auf den Grund überschmolzen, so entstehen durch Berührung mit dem Boden oder an heftiger bewegten Schichten kleine Eiskrystalle, die sich dann erheben, während ihres Steigens das Wasser ringsum in Eis verwandeln und sich dadurch ringsum vergrößern, so daß sie als runde Fladen von 1—2′ Durchmesser auf der Oberfläche anlangen (Pfannkucheneis). Auch diese Eiskuchenbildung geschieht oft plötzlich auf weite Strecken, erzeugt aber ebenfalls keine festen Massen, sondern nur einen dichten Eisbrei (Edlund 1863). — Nach Rudberg haben manche Legirungen zwei Erstarrungspunkte, einen höheren mit der Zusammensetzung veränderlichen, und einen niedrigeren constanten; nach Schultz (1869) gehört der letztere einem bestimmten Mischungsverhältnisse, der erstere dem überschüssigen Metall an. Ebenso verhalten sich solche Flüssigkeiten, die nur in begrenzten Verhältnissen mischbar sind. Nach Schultz wirkt auch eine Beimischung von Gasen erniedrigend auf den Gefrierpunkt und zwar um so stärker, je mehr Gas gelöst ist. Luftfreies Wasser in einem Kölbchen gefriert, wenn man dasselbe in schmelzendes, lufthaltiges Eis taucht.

409 **Die Regelation des Eises** (Faraday 1850). Wenn zwei Eisstücke von 0° mit den schmelzenden Oberflächen dicht an einander gebracht werden, so frieren diese Oberflächen zusammen; dieser Erscheinung gab Faraday den Namen Regelation. Dieselbe tritt ein, wenn sich die Flächen nur berühren, wie auch wenn sie durch schwachen oder starken Druck zusammengepreßt werden; im letzteren Falle ist das Zusammenfrieren rascher und fester als im ersteren. Sie geschieht nicht bloß bei niedriger Temperatur der Luft, sondern auch bei hoher, sogar im heißen Wasser. Vermöge der Regelation besitzt Eis durch Druck Plasticität, nicht aber durch Zug; preßt man Eis durch 2 Holzstücke zusammen, welche zwei gleichmäßig flache Höhlungen tragen, so erhält man eine durchsichtige Eislinse; läßt man eine gerade Eisstange durch eine Reihe allmälig stärker gekrümmter Formen unter Anwendung von Druck gehen, so kann man sie allmälig in einen Halbring umwandeln.

Schwimmt auf Wasser eine Anzahl von Eisstücken, die sich einander berühren, so kann man mit dem ersten alle anderen fortziehen, selbst wenn sie nur in Punkten an einander stoßen. Tyndall ging an einem heißen Sommertage in einen Eisladen und hob mit dem obersten Stücke eine ganze Schüssel voll Eis in die Höhe. Die Regelation geschieht aber nicht, wenn das Eis nicht im Schmelzen begriffen ist, wenn es kälter ist als 0°. Sehr kalter Schnee ballt sich nicht, weil bei dieser Temperatur die Oberfläche der kleinen Eistheilchen, aus denen der Schnee besteht, nicht mit Wasser bedeckt ist, und weil daher auch das Zusammenfrieren nicht stattfinden kann; dagegen ballt sich der Schnee gut, wenn er dem Aufthauen nahe ist, weil dann die kleinen Eistheilchen mittels ihres Oberflächenwassers zusammenfrieren. Ist das Schmelzen weiter vorangeschritten, so erhält man durch Zusammendrücken in der Hand einen Eisballen. Bringt man Schnee oder Eisstücke in eine Presse, so kann man vollkommen zusammenhängende, fast durchsichtige Eisblöcke daraus formen, die aus hohen Cylindern zu flachen und umgekehrt wieder zu hohen durch Druck umgebildet

verden können. Ganz in derselben Weise wird der Firnschnee der Alpenspitzen zu Gletscher-
is, das vermöge seiner Plasticität, die es der Regelation verdankt, die Thäler mit all ihren
Windungen, Verengungen und Erweiterungen erfüllt, ja sogar über steile Stellen zusammen-
ängend, wenn auch geborsten, hinübergeht, und, wenn es einen Sturz, einem Wasserfalle
hnlich erleidet, doch gleich unterhalb dieser Stelle wieder ein Ganzes bildet, wie der Fluß
nterhalb seines Falles (Gletschercascaden).

Ueber die Erklärung der Regelation besteht noch keine Einigkeit. Faraday hielt sie für
ine Contactwirkung des Eises, die in ähnlicher Weise stattfinde, wie ein sich zersetzender
Stoff seinen Zustand auf einen sehr nahen Stoff übertrage. Tyndall erklärt diese Contact-
virkung dadurch, daß mit der Berührung zweier Eisflächen das Flächenwasser ins Innere
es Eises eingeschlossen und dadurch die freie Beweglichkeit der flüssigen Moleküle gehemmt
verde. Schultz (1869) glaubt, das innere Wasser gefriere wegen Luftarmuth eher als äußeres
ufthaltiges Wasser. Helmholtz (1865) warf gegen solche Erklärungen die theoretische Schwie-
igkeit ein, daß durch das Gefrieren eine beträchtliche Quantität latenter Wärme frei werde,
eren Verschwinden durch jene Erklärungen unklar bleibe. Nun zeigte Pfaundler (1869),
aß bei der Berührung von Wasser und Eis sich zwar das Eisgewicht nicht ändern könne,
veil die Summe der leb. Kft. von Wasser- und Eiswärme dieselbe bleiben müsse, wohl
ber die Gestalt des Eises. Die fortschreitend bewegten Wassermol., die an das Eis schlagen,
önnen nämlich unverändert zurückgeworfen, können aber auch von den Eismol. festgehalten
verden, oder ihre Bewegung den Eismol. mittheilen und dieselben dadurch dem flüssigen Zu-
tande nahe bringen. Das Eis bietet nämlich dem Wasser wegen seines krystallinischen Zu-
tandes Mol. der verschiedensten Beschaffenheit dar, Mol., welche mit mittlerer, solche, welche
mit großer, und solche, welche mit kleiner Kraft in ihrer Gleichgewichtslage verharren; diese
rei verschiedenen Zustände müssen auf die Wassermol. die drei genannten Wirkungen aus-
iben, es wird daher das Eis an einer Stelle unverändert bleiben, an anderen zu-, an an-
eren abnehmen. Daher können sich zwischen Eisflächen dünne, vereinigende Eisbrücken bil-
en. Pfaundler zeigte dies an einer in einem Glaskolben schwimmenden Eiskugel von nahezu
leicher Größe, welche, in schmelzenden Schnee getaucht, innen durch kugelkreisförmige Eis-
rücken an das Glas anfror. Hiermit ist die Regelation ohne Druck dargethan. Durch
rhöhten Druck, so geben alle Forscher zu, wird die Regelation bedeutend beschleunigt und
ermehrt nach der Thomson-Helmholtz'schen Erklärung: Durch den Druck wird der Schmelz-
unkt erniedrigt; schmelzendes Eis wird daher durch Druck kälter und bringt so das um-
iegende Wasser zum Gefrieren. Dieser Druckkälte des Eises ist offenbar die rasche Regelation
usammengepreßter Eisstücke, wie auch die Regelation der Gletscher zuzuschreiben; Helmholtz
ielt aber auch das Zusammenfrieren von blos genäherten Eisstücken für eine Folge capil-
aren Druckes, welche Annahme nach Pfaundlers Erklärung nicht mehr nöthig erscheint.

3. Die Verdampfung (Clausius 1857). Die Verdampfung eines Körpers **410**
indet sowohl an der Oberfläche als im Inneren desselben statt; das Verdampfen
n der Oberfläche nennt man Verdunsten, das Verdampfen im Inneren Sieden
der Kochen. Das Verdunsten geschieht bei jeder Temperatur; das Sieden aber
rst bei einer bestimmten Temperatur, welche hauptsächlich von der Natur der
Flüssigkeit und dem Drucke auf dieselbe abhängt, und welche man Siedepunkt nennt.
Außer der Erwärmung bis zum Siedepunkte ist zum Sieden, sowie auch zum Ver-
unsten, noch eine gewisse Wärmemenge nöthig, welche zur Verdampfung verbraucht
vird, und welche wir *Dampfwärme* nennen wollen.

Damit ein Körper luftförmig werde, muß die leb. Kft. der Mol. so vergrößert wer-
en, daß dieselben ganz aus dem Wirkungskreise der Anziehung der übrigen Mol. heraus-
reten. Zu diesem Zwecke müssen die Mol. weit von einander entfernt werden; es ist daher
ie Anziehung auf einem großen Wege zu überwinden. Wenn dieselbe nun auch im flüs-
igen Zustande nahezu gleich Null ist und während der Verdampfung immer noch kleiner
vird, so ist doch die Arbeit zur Ueberwindung der Anziehung beträchtlich, weil der Weg
roß ist, auf dem diese Ueberwindung geschehen muß. Außerdem ist gewöhnlich bei der Ver-
ampfung ein äußerer Druck, meistens der Luftdruck, zurück zu schieben, und zwar wegen
er bedeutenden Volumvergrößerung bei der Verdampfung auf einem ebenfalls großen Wege.
Endlich ist es möglich, worauf die abnormen Dampfdichten hinweisen, daß im festen Zu-
tande die Mol mehr At. enthalten als im flüssigen, und im flüssigen mehr als im luft-
örmigen, so daß also beim Schmelzen und Verdampfen die Mol. gespalten werden müssen,
vozu wegen der starken Atomanziehung viel Arbeit nöthig wäre. Es sind also bei der Ver-
ampfung zwei oder drei beträchtliche Arbeiten zu leisten, innere Arbeit, die Disgregations-
ermehrung, und äußere Arbeit, die Zurückschiebung des äußeren Druckes. Diese Arbeiten
nüssen von zugeführter Wärme geleistet werden; folglich wird bei der Verdampfung Wärme

Krystallkeimen verhindert wird; dieselbe Wirkung hat die Adhäsion in Capillarröhren, in welchen Wasser schon bis auf — 20° ohne zu erstarren abgekühlt wurde. Das Unterkühlen des Wassers erklärt die Bildung von **Grundeis** im süßen Wasser.

Wie feste Mischungen einen niedrigeren Schmelzpunkt, so haben flüssige Mischungen einen niedrigeren Erstarrungspunkt. Lösungen in Wasser gefrieren erst unter 0° und zwar um so tiefer unter 0°, je concentrirter sie sind. Nach Rüdorff (1861) ist die Erniedrigung dem Procentgehalte der Lösung proportional; mit 2% Kochsalz gefriert Wasser bei — 1,2°, mit 12% bei — 7,2°; doch muß bei diesem Gehalte das Krystallwasser mancher Salze mitgerechnet werden, woraus man schloß, daß manche Salze sich als wasserhaltige Salze lösen. Beim Erstarren von Salzlösungen gefriert reines Wasser als salzfreies Eis heraus; man macht deßhalb das Meerwasser durch Gefrierenlassen in abgeschlossenen Räumen concentrirter, um es dann zur Salzbereitung zu benutzen. Wenn eine gefrorene Salzlösung noch Salz enthält, so findet sich dasselbe als flüssige concentrirte Schicht zwischen salzfreien Eisblättern. — Der Gefrierpunkt des **Meerwassers** liegt bei — 2,2°; doch kann dasselbe selbst bei gewöhnlicher Bewegung tief unterkühlt werden, und erstarrt dann erst bei heftigster Bewegung oder bei Berührung mit festen Körpern, besonders mit Eis- oder Schneekörnern, und dies mit solcher Raschheit, daß sich oft plötzlich das kurz vorher ganz eisfreie Meer in Eis verwandelt, aber wegen der Erstarrungswärme und wegen der übrig bleibenden concentrirten Lösung nur in einen Eisbrei. Sehr bedeutend ist im Meere auch die Bildung von Grundeis, weil das Meerwasser, abweichend vom reinen Wasser, **seine größte Dichte** erst **etwa bei** — 5° hat und daher durch und durch überschmelzen kann. In den nördlichen Meeren sieht man deßhalb an flachen Stellen den Boden ganz mit Eis bedeckt; doch ist die Grundeisbildung bis in 200′ Tiefe nachgewiesen. Ist im Winter allmälig das Meer bis auf den Grund überschmolzen, so entstehen durch Berührung mit dem Boden oder an heftiger bewegten Schichten kleine Eiskrystalle, die sich dann erheben, während ihres Steigens das Wasser ringsum in Eis verwandeln und sich dadurch ringsum vergrößern, so daß sie als runde Fladen von 1—2′ Durchmesser auf der Oberfläche anlangen (Pfannkuchen). Auch diese Eiskuchenbildung geschieht oft plötzlich auf weite Strecken, erzeugt aber ebenfalls keine festen Massen, sondern nur einen dichten Eisbrei (Edlund 1863). — Nach Rudberg haben manche Legirungen zwei Erstarrungspunkte, einen höheren mit der Zusammensetzung veränderlichen, und einen niedrigeren constanten; nach Schultz (1869) gehört der letztere einem bestimmten Mischungsverhältnisse, der erstere dem überschüssigen Metall an. Aehnlich verhalten sich solche Flüssigkeiten, die nur in begrenzten Verhältnissen mischbar sind. Nach Schultz wirkt auch eine Beimischung von Gasen erniedrigend auf den Gefrierpunkt und zwar um so stärker, je mehr Gas gelöst ist. Luftfreies Wasser in einem Kölbchen gefriert, wenn man dasselbe in schmelzendes, lufthaltiges Eis taucht.

409 **Die Regelation des Eises** (Faraday 1850). Wenn zwei Eisstücke von 0° mit den schmelzenden Oberflächen dicht an einander gebracht werden, so frieren diese Oberflächen zusammen; dieser Erscheinung gab Faraday den Namen Regelation. Dieselbe tritt ein, wenn sich die Flächen nur berühren, wie auch wenn sie durch schwachen oder starken Druck zusammengepreßt werden; im letzteren Falle ist das Zusammenfrieren rascher und fester als im ersteren. Sie geschieht nicht blos bei niedriger Temperatur der Luft, sondern auch bei hoher, sogar im heißen Wasser. Vermöge der Regelation besitzt Eis durch Druck Plasticität, nicht aber durch Zug; preßt man Eis durch 2 Holzstücke zusammen, welche zwei gleichmäßig flache Höhlungen tragen, so erhält man eine durchsichtige Eislinse; läßt man eine gerade Eisstange durch eine Reihe allmälig stärker gekrümmter Formen unter Anwendung von Druck gehen, so kann man sie allmälig in einen Halbring umwandeln.

Schwimmt auf Wasser eine Anzahl von Eisstücken, die sich einander berühren, so kann man mit dem ersten alle anderen fortziehen, selbst wenn sie nur in Punkten an einander stoßen. Tyndall ging an einem heißen Sommertage in einen Eisladen und hob mit dem obersten Stücke eine ganze Schüssel voll Eis in die Höhe. Die Regelation geschieht aber nicht, wenn das Eis nicht im Schmelzen begriffen ist, wenn es kälter ist als 0°. Sehr kalter Schnee ballt sich nicht, weil bei dieser Temperatur die Oberfläche der kleinen Eistheilchen, aus denen der Schnee besteht, nicht mit Wasser bedeckt ist, und weil daher auch das Zusammenfrieren nicht stattfinden kann; dagegen ballt sich der Schnee gut, wenn er dem Aufthauen nahe ist, weil dann die kleinen Eistheilchen mittels ihres Oberflächenwassers zusammenfrieren. Ist das Schmelzen weiter vorangeschritten, so erhält man durch Zusammendrücken in der Hand einen Eisballen. Bringt man Schnee oder Eisstücke in eine Presse, so kann man vollkommen zusammenhängende, fast durchsichtige Eisblöcke daraus formen, die aus hohen Cylindern zu flachen und umgekehrt wieder zu hohen durch Druck umgebildet

:r hierdurch in überhitzten Dampf verwandelt worden wäre. — Der gesättigte, wie
er überhitzte Dampf erscheinen äußerlich häufig den meisten Gasen gleich, nämlich
'arblos und durchsichtig und daher unsichtbar; doch ist der gesättigte Dampf in seinen
meren Eigenschaften sehr von den Gasen verschieden. Wird gesättigter Dampf, ge=
rennt oder berührt von seiner Flüssigkeit, bei gleichbleibender Temperatur zusam=
nengedrückt, so erhöht er nicht, wie es die Gase thun, seine Dichte und seine Span=
nung, sondern beide behalten dieselbe Größe, während ein Theil des Dampfes zu
Flüssigkeit condensirt wird, da der kleinere Raum nicht dieselbe Dampfmenge fassen
ann; auch hier tritt wieder die Eigenschaft hervor, daß der gesättigte Dampf das
Maximum der Spannung besitzt. Wird gesättigter Dampf, der noch mit Flüssig=
eit in Verbindung steht, ohne Temperaturänderung ausgedehnt, ohne eine Arbeit
u vollbringen, so vermindern sich Spannung und Dichte nicht wie bei den Gasen,
ondern sie behalten denselben Werth, indem ein Theil der Flüssigkeit in Dampf
übergeht. Wenn man die Temperatur von gesättigtem, Flüssigkeit berührendem
Dampfe erhöht, so steigert sich seine Spannung nicht wie bei den Gasen nach dem
Mariotte=Gaylussac'schen Gesetze für jeden Grad um 1/273, sondern um einen grö=
ßeren Betrag; denn es entwickelt sich noch neuer Dampf, dessen Spannung sich zu
er erhöhten des früher vorhandenen Dampfes summirt. Umgekehrt, wird gesättig=
er Dampf abgekühlt, so wird seine Spannung stärker als um 1/273 vermindert,
ndem mit der Abkühlung eine Condensation verbunden ist. Wenn gesättigter
Dampf durch seine Ausdehnung Arbeit leistet, so wird ebenfalls ein Theil dessel=
ben als Flüssigkeit niedergeschlagen, weil zur Leistung der Arbeit ein Wärmever=
brauch nöthig ist, durch einen solchen aber Dampf condensirt wird (Clausius und
Rankine 1860).

Die Eigenschaften des gesättigten Dampfes sind eine Folge der molekularen Bewe-
gungen der Flüssigkeit und des Dampfes. Die in einen Dampfraum von der Flüssigkeit
abströmenden Mol. werden von den Grenzen des Raumes oder von anderen Mol. zurück-
geworfen und gelangen so wieder an die Oberfläche der Flüssigkeit oder an die condensirte
Flüssigkeitschicht einer anderen Grenzwand, wo sie theilweise durch die Anziehung der Mol.
estgehalten und dadurch wieder mit der Flüssigkeit vereinigt werden; offenbar können auch
usammenstoßende Mol., da ihre fortschreitende Bewegung noch nicht schnell genug geschieht,
ich einander festhalten, wodurch innerhalb des Dampfes Molekülgruppen entstehen, die dem
üssigen Zustande nahe sind; solche Molekülgruppen können auch durch das Aufwallen des
Dampfes aus der Flüssigkeit mitgerissen werden; sie sind wie die Flüssigkeit im Verdampfen
egriffen. So lange von der Flüssigkeit und den Molekülgruppen mehr Mol. fortfliegen als
urückkehren, ist der Dampf nicht gesättigt; dies ist um so länger der Fall, je höher die
Temp. ist, weil dann die Menge der abströmenden Mol. größer ist. Kehren ebenso viele Mol.
ur Flüssigkeit und zu den Gruppen zurück, als in derselben Zeit abströmen, so ist der Dampf
esättigt; in diesem Zustande kann sich die Zahl der Molekülgruppen nicht mehr vermin-
ern; der gesättigte Dampf enthält also am meisten Molekülgruppen. — Wird der gesättigte
Dampfraum verkleinert, so vermehrt sich die Zahl der zurückkehrenden Mol., die der ent-
ehenden bleibt ungeändert, folglich wird der Dampf an der Flüssigkeit und an den Gruppen
ondensirt. Wird der Dampfraum vergrößert, so schreiten die nach der zurückweichenden
Grenzwand gerichteten Mol. weiter fort, statt zurückzukehren; während also das Abströmen
er Dampfmol. von der Flüssigkeit fortdauert, kehren weniger Mol. zu derselben zurück; es
indet demnach erneuerte Verdampfung statt. Leisten aber die voranströmenden Mol. hierbei
ine Arbeit, so verlieren sie einen Theil ihrer Geschw., wodurch ihre Vereinigung zu Flüssig-
eit befördert und so Condensation bewirkt wird.

Der Nachweis ist leicht mit Torricelli'schen Röhren zu führen, die man nahezu mit
Quecksilber füllt, dann mit Aether, Alkohol, Wasser vollgießt und auf die bekannte Weise
mkehrt und in hohe Quecksilbergefäße taucht. Die Flüssigkeiten erscheinen dann auf dem
Quecksilber und verdampfen in der Torricelli'schen Leere. Das Quecksilber fängt sogleich
n zu fallen, während die Flüssigkeit sich vermindert; bald aber bleibt das Quecksilber fest
nd bestimmt an gewissen Stellen stehen, obwohl noch Flüssigkeit übrig ist: die Räume sind
tzt dampfgesättigt. Beim Aether steht das Quecksilber am tiefsten, beim Wasser am höchsten,
woraus ersichtlich, daß bei gleicher Temp. der Aether stärker als Alkohol und dieser stärker
ls Wasser verdampft. Schiebt man die Röhren tiefer in das Quecksilbergefäß, so verklei-

verzehrt, die Dampfwärme. Es kann zwar auch der Fall eintreten, daß keine äußere Arbeit zu leisten ist; aber ein Verbrauch von Dampfwärme findet immer statt, mag die Verdampfung bei hoher oder niedriger Temp., bei Luftdruck oder Luftleere, im Inneren oder an der Oberfläche geschehen. Hiermit stimmt das Verdampfen mit dem Schmelzen überein; ein Unterschied zwischen beiden Vorgängen liegt aber darin, daß zur Verdampfung nicht immer eine Temperaturerhöhung der Flüssigkeit nöthig ist, wie zur Schmelzung eines festen Körpers; denn im flüssigen Zustande ist die Anziehung der Mol. schon nahe gleich Null, kann also schon bei einer geringen Erhöhung der leb. Kft. der Mol. überwunden werden, und wird überwunden, wenn die nöthige Arbeit, die Dampfwärme zu Gebote steht. Diese Erhöhung der leb. Kft. eines Mol. kann z. B. an der Oberfläche durch einen Stoß der Nachbarmol. hervorgebracht werden, wodurch das Mol. aus der Wirkungssphäre der Anziehung heraus geschleudert und dadurch ein freies Gasmol. wird; an der Oberfläche verdampfen daher die Flüssigkeiten bei jeder Temp. Im Inneren einer Flüssigkeit ist dieses Fortschleudern eines Mol. nur möglich, wenn sich Luftbläschen, lufterfüllte Hohlräume, wenn auch von unmerklicher Kleinheit in derselben finden; zwischen die Luftmol. eines solchen Bläschens können dann die Dampfmol. der Flüssigkeit einströmen. Durch ihre leb. Kft. üben dieselben auf die Grenzfläche des Bläschens einen Druck aus, sie geben dem Dampfe eine gewisse Spannung. Ist diese Spannung, dieser Druck gegen die Haut der Bläschen groß genug, den auf den Bläschen lastenden Druck der äußeren Luft und der Flüssigkeit zurückzuschieben, so wird sich das Bläschen zu einer Dampfblase vergrößern, die Flüssigkeit wird sieden. Zum Sieden ist also nöthig, daß die Spannung des im Inneren der Flüssigkeit entstehenden Dampfes dem äußeren Drucke gleich sei. Diese Spannung wächst aber offenbar mit der Temp. der Flüssigkeit und des Dampfes; denn je höher die Temp. der Flüssigkeit ist, um so größer ist die leb. Kft. ihrer Theilchen, um so leichter wird also die Geschw. eines Mol. bis zur Freiheit von der Anziehung erhöht, um so zahlreicher sind daher die entstehenden Dampftheilchen; und je höher die Temp. des Dampfes ist, um so größer ist die Geschw., also auch die leb. Kft. der Dampftheilchen. *Durch erhöhte Temp. wird also sowohl die Zahl, wie die leb. Kft. der Dampfmol. vermehrt; folglich wächst die Dampfspannung mit der Temp.* Ist nun kein oder nur ein geringer Luftdruck vorhanden, so haben die in die Luftbläschen einströmenden Dampftheilchen, um dieselben zu Dampfblasen zu erweitern, nur das kleine Gewicht der über den Bläschen ruhenden Flüssigkeitssäulchen zu überwinden, wozu sie nur einer geringen leb. Kft., einer niedrigen Temp. bedürfen; unter gänzlicher Luftleere oder unter niedrigem Luftdrucke geschieht die Dampfbildung im Inneren oder das Sieden schon bei sehr niederen Temperaturen. Bei gewöhnlichem Luftdrucke aber oder bei noch höherem Dampfdrucke ist das Sieden erst möglich, wenn durch erhöhte Temp. die Spannung des Dampfes im Inneren der Bläschen vergrößert und dem äußeren Drucke wenigstens gleich gemacht wird; dann können die Bläschen sich zu Dampfblasen vergrößern, die durch Auftrieb in die Höhe steigen und so das für das Kochen charakteristische Aufwallen der Flüssigkeit veranlassen. — Nach dieser Theorie des Siedens tritt dasselbe nur in einer bläschenhaltigen Flüssigkeit bei der Temp. ein, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleichkommt; fehlen diese Bläschen, so kann das Sieden nur stattfinden, wenn durch die gesteigerte Molekularbewegung eine Partie der Flüssigkeitstheilchen aus einander geht und dadurch ein Bläschen bildet, wozu eine höhere Temp. erforderlich ist.

411 **Der gesättigte Dampf.** Jeder Raum kann bei einer bestimmten Temperatur nicht mehr als eine bestimmte Dampfmenge aufnehmen, die neben der Größe des Raumes und der Natur der Flüssigkeit nur von der Temperatur abhängt und mit dieser zunimmt. Enthält der Raum soviel Dampf, als er bei der betreffenden Temperatur aufnehmen kann, so nennt man ihn mit Dampf gesättigt, und der Dampf selbst wird gesättigter oder saturirter Dampf genannt; enthält ein Raum nicht soviel Dampf, als er bei seiner Temperatur aufnehmen könnte, so wird der Dampf ungesättigter oder überhitzter Dampf genannt. Gibt man einem Flüssigkeit enthaltenden Raume eine bestimmte Temperatur, so befindet sich anfänglich über der Flüssigkeit überhitzter Dampf, dessen Dichte und Spannung allmälig zunehmen, bis endlich der Raum mit Dampf gesättigt ist, wodurch dessen Spannung und Dichte den höchsten Grad erreicht haben, der bei jener Temperatur möglich ist; man sagt, der gesättigte Dampf hat das Maximum der Spannung. Indessen ist gesättigter Dampf ebenso wohl als überhitzter außer Berührung mit seiner Flüssigkeit denkbar; es ist für den gesättigten Dampf nur die Voraussetzung nöthig, daß er seit seiner Trennung von der Flüssigkeit keiner Temperaturerhöhung ausgesetzt war, da

^{mm}, bei 0° = 4,6^{mm}, bei — 10° = 1^{mm}, bei — 31° = 0,3^{mm}. — Hieraus ist
hon zu erkennen, daß ein einfaches Gesetz für den Zusammenhang der Größe
r Spannung mit der Temperatur nicht besteht; noch genauer geht dies aus den
hlreichen Forschungen hervor, die seit Jahrhunderten zum Zwecke der Auffindung
nes solchen Gesetzes gemacht wurden und in den eingehenden und genauen Unter=
ichungen von Regnault und Magnus (1843) ihren Höhepunkt fanden; diese
orscher stellten wohl für den Wasserdampf Formeln auf, die sehr genau den
ersuchsresultaten genügen, aber wegen ihrer Verwickeltheit und Unableitbarkeit
icht den Charakter eines Gesetzes tragen. So gibt Magnus die Formel

$$S = 4,525 \,.\, 10^{\frac{74475\,t}{234,69 + t}}$$

orin S die Spannung und t die Temperatur bedeutet; noch verwickelter sind die
ormeln von Regnault, welche außerdem noch für verschiedene Temperaturintervalle
rschieden sind. Doch existirt auch eine Formel von Regnault, welche dazu dienen
ann, die ganze Reihe der Spannungen wiederzugeben; sie lautet:

$$\log S = a - b \,.\, \alpha^x - c \,.\, \beta^x$$

orin $x = t + 20$, $\log \alpha = 0,994\,049\,292 - 1$, $\log \beta = 0,988\,343\,882 - 1$,
g $b = 0,1\,397\,743$, $\log c = 0,6\,924\,351$, $a = 6,2\,640\,348$.

Ebenso wenig wie durch Induction, ist es durch Deduction gelungen, das Gesetz
r die Abhängigkeit der Spannung von der Temperatur zu finden, obgleich leicht
nzusehen ist, daß die Spannung mit der Temperatur zunehmen muß; denn durch
ie Erhöhung der Temperatur nimmt nach Gaylussacs Gesetz die Spannung jedes
ases zu, und außerdem vermehrt sich die Dampfentwickelung, so daß bei höherer
emperatur mehr Dampfmoleküle mit größerer lebendiger Kraft einwirken. Auch
r verschiedene Dämpfe besteht kein einfacher Zusammenhang; nur die Folgerung
egt sehr nahe, daß die Spannung eines Dampfes durchschnittlich um so höher
t, je niedriger sein Siedepunkt liegt, da beim Siedepunkte die Spannung aller
Dämpfe dieselbe, nämlich gleich dem Luftdrucke ist. So ist bei 120° die Spannung
on Aetherdampf = 10^{at}, von Schwefelkohlenstoffdampf = 7^{at}, von Alkoholdampf
= 5^{at}, von Chloroformdampf = 4^{at}, von Wasserdampf = 2^{at}; Quecksilberdampf
at erst bei 375° 1^{at} und bei 400° 2^{at} Spannung. — Dalton hatte sogar aus
inen Versuchen das Gesetz gefolgert, daß die Spannungen der Dämpfe in gleichen
bständen von den Siedepunkten einander gleich seien, was sich im Allgemeinen
ls unrichtig, für einzelne Flüssigkeitsgruppen aber als giltig erwiesen hat. Düh=
ing hat (1878) das Gesetz aufgestellt: Von den Siedepunkten beliebiger Sub=
anzen, wie sie für irgend einen für alle gemeinsamen Druck als Ausgangspunkte
egeben sein mögen, sind bis zu den Siedepunkten für irgend einen anderen
emeinsamen Druck die Temperaturabstände sich gleichbleibende Vielfache von=
inander. Van der Waals hat (1880) dies für einen spec. Fall der allgemeinen
esetze erklärt, die er über den Siedepunkt, den kritischen Punkt u. s. w. aufgestellt
at (425.) — Die Spannung der Dämpfe von Salzlösungen ist geringer als die
Spannung der Dämpfe des Lösungsmittels bei derselben Temperatur in reinem
Zustande; die Verminderung ist verschieden für verschiedene Salze; für jedes ein=
lne Salz ist sie der gelösten Salzmenge proportional; außerdem wächst die Ver=
inderung mit der Temperatur (Wüllner 1860). Die Spannung der Dämpfe
on Flüssigkeitsgemischen ist nicht, wie man früher glaubte, gleich der Summe der
Spannungen der Dämpfe der Bestandtheile, sondern im Allgemeinen geringer als
iese Summe (Magnus 1836); nach Regnault (1854) erreicht die Spannung bei
lchen Gemischen, die wie Wasser und Aether sich nur in einer begrenzten Menge
ischen, kaum diejenige des flüchtigeren Gemengtheiles, bleibt aber bei solchen, die
ch in allen Verhältnissen mischen, wie Wasser und Weingeist, tief unter dieser

Spannung zurück (Wüllner 1866), während bei Gemengen, die sich nicht mischen, wie Wasser und Oel, oder Wasser und Schwefelkohlenstoff die Spannung des Dampfgemenges der Summe der Spannungen der Gemengtheile sehr nahe gleich ist. Für die Spannung der Dämpfe in gaserfüllten Räumen gilt das Dalton'sche Gesetz (1801): Die Spannung eines Gemenges aus Luft und Dampf ist gleich der Summe der Spannungen der Luft und des Dampfes, jede bei gleicher Temperatur für sich genommen. Indeß gilt dieses Gesetz nicht unbeschränkt; die Spannung des Dampfes ist vielmehr im Vacuum um einen sehr kleinen Betrag größer als in Gasen; die Abweichung ist um so größer, je flüchtiger die Flüssigkeit ist (Regnault 1854).

Daß für die Zunahme der Spannung mit der Temp. kein einfacher Zusammenhang besteht, ist leicht erklärlich; die Spannung nimmt nicht blos nach Mariotte-Gay-Lussac'schem Gesetz durch die Vermehrung der Energie der Mol. zu, sondern auch dadurch, daß bei höherer Temp. immer neue Dampfmol. in großer Zahl in den Dampfraum treten; der Zusammenhang muß also ein complicirter sein und abhängig von der materiellen Beschaffenheit der Flüssigkeit. Um die Zunahme der Spannung mit der Temp. wahrzunehmen, kann man mehrere Torricelli'sche Röhren benutzen, in deren Vacuum man eine Flüssigkeit gebracht hat. Sowie die Flüssigkeit in das Vacuum gelangt, sinkt das Quecks.; der Betrag des Sinkens mißt die Spannung des entstandenen Dampfes. Erhitzt man die Flüssigkeit durch das Ueberschieben eines heißen Metallringes, so fällt das Quecks., und zwar um so mehr, je heißer der Metallring ist. Vergleichungen der Spannung mit der Temp. können vorgenommen werden, wenn man den ganzen Apparat in ein allmälig erhitzbares Oel- oder Wasserbad bringt; man sieht dann das Quecks. mit zunehmender Temp. fallen. Wenn endlich die Flüssigkeit über dem Quecks. zum Sieden kommt, so ist das letztere in der Röhre herabgedrückt bis zum Spiegel des Quecks. im Gefäße, woraus sich ergibt, daß beim Siedepunkte die Dampfspannung gleich dem Luftdrucke ist. Für Temp. über dem Siedepunkte benutzt man eine hohe, oben offene Glasröhre, die unten umgebogen und zu einem weiten, offenen Gefäße ausgeblasen ist. Dieses füllt man theilweise mit Quecks. und bringt auf dasselbe die Flüssigkeit, welche alsdann zum Kochen erhitzt wird, um die Luft auszutreiben; wird nun das Gefäß mit einem luftdicht schließenden und ein Therm. tragenden Stöpsel verschlossen, und nach der Abkühlung abermals erwärmt, so drücken die entstehenden Dämpfe das Quecks. in der Röhre in die Höhe; der Höhenunterschied der beiden Spiegel gibt die Dampfspannung bei der am Therm. wahrnehmbaren Temp. an. Hierzu kann man auch den Papin'schen Topf (Denis Papin 1681) benutzen (Fig. 263), ein starkes Metallgefäß mit einem fest aufgeschraubten Deckel, an welchem ein Sicherheitsventil cd und ein Therm. ba angebracht sind; in dem Gefäße ist eine Flüssigkeit, die durch Erhitzung zum Verdampfen gebracht wird; mit dem Dampfraume steht durch das Rohr be ein Quecksilbergefäß in Verbindung, durch dessen Deckel luftdicht die Röhre g bis in das Quecks. geht. Der Dampf drückt dasselbe in die Röhre; die Höhe der Quecksilbersäule gibt die Dampfspannung bei der an dem Therm. sichtbaren Temp. an. Mittels ähnlicher Methoden wurden die Dampfspannungen von zahlreichen Forschern untersucht.

Fig. 263.

Die folgende Tafel enthält die Resultate von Regnault für Wasserdampf; S bedeutet die Spannung in Millimetern, T die Temperatur.

414

Tafel der Spannung des Wasserdampfes nach Regnault:

T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
—32	0,320	11	9,792	37	46,69	63	170,8	89	505,7	170	5962 = 8at
—30	0,386	12	10,46	38	49,30	64	178,7	90	525,4	180	7546 = 10at
—25	0,605	13	11,16	39	52,04	65	186,9	91	545,7	190	9442
—20	0,927	14	11,91	40	54,91	66	195,5	92	566,7	200	11689 = 16at
—15	1,400	15	12,70	41	57,91	67	204,4	93	588,3	210	14325
—10	2,093	16	13,54	42	61,05	68	213,6	94	610,7	220	17390 = 23at
— 9	2,267	17	14,42	43	64,35	69	223,2	95	633,7		
— 8	2,455	18	15,36	44	67,79	70	233,1	96	657,4		
— 7	2,658	19	16,37	45	71,39	71	243,4	97	681,9		
— 6	2,876	20	17,39	46	75,16	72	254,1	98	707,2		
— 5	3,113	21	18,49	47	79,09	73	265,1	99	733,2		
— 4	3,368	22	19,66	48	83,20	74	276,6	100	760,0 = 1at		
— 3	3,644	23	20,89	49	87,50	75	288,5	102	816,1		
— 2	3,941	24	22,18	50	91,98	76	300,8	104	875,4		
— 1	4,263	25	23,55	51	96,66	77	313,5	106	938,5		
0	4,600	26	24,99	52	101,5	78	326,8	108	1003		
1	4,940	27	26,50	53	106,6	79	340,5	110	1075 = 1½at		
2	5,302	28	28,10	54	111,9	80	354,6	115	1269		
3	5,687	29	29,78	55	117,5	81	369,3	120	1491 = 2at		
4	6,097	30	31,55	56	123,2	82	384,4	125	1744		
5	6,534	31	33,41	57	129,3	83	400,1	130	2030		
6	6,998	32	35,36	58	136,5	84	416,3	135	2354 = 3at		
7	7,492	33	37,41	59	142,0	85	433,0	140	2718		
8	8,017	34	39,56	60	148,8	86	450,3	145	3326 = 4at		
9	8,574	35	41,83	61	155,8	87	468,2	150	3581		
10	9,165	36	44,20	62	163,2	88	486,6	160	4652		

Die folgende Tafel gibt an, bei welchen verschiedenen Temp. die verschiedenen Dämpfe gleiche Spannungen besitzen, läßt also auch erkennen, wie verschieden die Spannungen verschiedener Dämpfe bei derselben Temp. sind. Sie sind nach den Siedepunkten geordnet, wodurch auch das angeführte Gesetz augenfällig wird. Aetherdampfmaschinen wären nach dieser Tabelle die vortheilhaftesten, wenn der Aether billiger wäre; noch höher sind die Spannungen der Kohlendioxyddämpfe, bei 0° = 35at, bei 45° = 100at.

415

Vergleichtafel der Spannungen verschiedener Dämpfe:

S in Atm.	Aether	Chloroform	Alkohol	Wasser	Quecksilber
1	35°	60°	78	100	357
2	56	83	97	121	397
3	70	98	109	134	423
4	80	109	118	144	442
5	89	119	125	152	458
6	96	127	132	159	472
7	103	134	138	165	484
8	109	141	143	171	494
9	114	147	147	176	505
10	119	152	152	180	514

Die Verminderung der Spannung der Dämpfe von Salzlösungen folgt daraus, daß solche Lösungen einen höheren Siedepunkt haben; da nämlich bei diesem höheren Siedepunkte die Dampfspannung erst gleich dem Luftdrucke ist, so ist sie bei 100° noch nicht gleich dem Luftdrucke, also kleiner wie die Spannung des Dampfes von reinem Wasser bei 100°; folglich ist auch bei anderen Temp. die Spannung vermindert; die Verminderung beträgt z. B. für eine Lösung von Kochsalz, die 10 Theile Salz auf 100 Theile Wasser enthält, = 0,06 S, für eine analoge Salpeterlösung = $0{,}0196\,S + 0{,}0000108\,S^2$. — Die Erniedrigung der Spannungen für solche Mischungen, die den chemischen Verbindungen nahekommen, ist dadurch zu erklären, daß chemische Verbindungen, also auch solche Lösungen mit einer Verminderung der Disgregation (Wasser = Wasserstoff + Sauerstoff) verbunden sind und daher einen höheren Siedepunkt haben, wodurch bei gleicher Temp. die Spannung geringer wird. — Die Spannung der Dämpfe in Gasen bedarf einer speciellen Betrachtung. —

Spannung zurück (Wüllner 1866), während bei Gemengen, die sich nicht mischen, wie Wasser und Oel, oder Wasser und Schwefelkohlenstoff die Spannung des Dampfgemenges der Summe der Spannungen der Gemengtheile sehr nahe gleich ist. Für die Spannung der Dämpfe in gaserfüllten Räumen gilt das Dalton'sche Gesetz (1801): Die Spannung eines Gemenges aus Luft und Dampf ist gleich der Summe der Spannungen der Luft und des Dampfes, jede bei gleicher Temperatur für sich genommen. Indeß gilt dieses Gesetz nicht unbeschränkt; die Spannung des Dampfes ist vielmehr im Vacuum um einen sehr kleinen Betrag größer als in Gasen; die Abweichung ist um so größer, je flüchtiger die Flüssigkeit ist (Regnault 1854).

Daß für die Zunahme der Spannung mit der Temp. kein einfacher Zusammenhang besteht, ist leicht erklärlich; die Spannung nimmt nicht blos nach Mariotte-Gaylussacs Gesetz durch die Vermehrung der Energie der Mol. zu, sondern auch dadurch, daß bei höherer Temp. immer neue Dampfmol. in großer Zahl in den Dampfraum treten; der Zusammenhang muß also ein complicirter sein und abhängig von der materiellen Beschaffenheit der Flüssigkeit. Um die Zunahme der Spannung mit der Temp. wahrzunehmen, kann man wieder Torricelli'sche Röhren benutzen, in deren Vacuum man eine Flüssigkeit gebracht hat. Sowie die Flüssigkeit in das Vacuum gelangt, sinkt das Queckf.; der Betrag des Sinkens mißt die Spannung des entstandenen Dampfes. Erhitzt man die Flüssigkeit durch das Ueberschieben eines heißen Metallringes, so fällt das Queckf., und zwar um so mehr, je heißer der Metallring ist. Vergleichungen der Spannung mit der Temp. können vorgenommen werden, wenn man den ganzen Apparat in ein allmälig erhitzbares Oel- oder Wasserbad bringt; man sieht dann das Queckf. mit zunehmender Temp. fallen. Wenn endlich die Flüssigkeit über dem Queckf. zum Sieden kommt, so ist das letztere in der Röhre herabgedrückt bis zum Spiegel des Queckf. im Gefäße, woraus sich ergibt, daß beim Siedepunkte die Dampfspannung gleich dem Luftdrucke ist. Für Temp. über dem Siedepunkte benutzt man eine hohe, oben offene Glasröhre, die unten umgebogen und zu einem weiten, offenen Gefäße ausgeblasen ist. Dieses füllt man theilweise mit Queckf. und bringt auf dasselbe die Flüssigkeit, welche alsdann zum Kochen erhitzt wird, um die Luft auszutreiben; wird nun das Gefäß mit einem luftdicht schließenden und ein Therm. tragenden Stöpsel verschlossen, und nach der Abkühlung abermals erwärmt, so drücken die entstehenden Dämpfe das Queckf. in der Röhre in die Höhe; der Höhenunterschied der beiden Spiegel gibt die Dampfspannung bei der am Therm. wahrnehmbaren Temp. an. Hierzu kann man auch den Papin'schen Topf (Denis Papin 1681) benutzen (Fig. 263), ein starkes Metallgefäß mit einem fest aufgeschraubten Deckel, an welchem ein Sicherheitsventil cd und ein Therm. ba angebracht sind; in dem Gefäße ist eine Flüssigkeit, die durch Erhitzung zum Verdampfen gebracht wird; mit dem Dampfraume steht durch das Rohr be ein Quecksilbergefäß in Verbindung, durch dessen Deckel luftdicht eine hohe Röhre g bis in das Queckf. geht. Der Dampf drückt dasselbe in die Röhre; die Höhe der Quecksilbersäule gibt die Dampfspannung bei der an dem Therm. sichtbaren Temp. an. Mittels ähnlicher Methoden wurden die Dampfspannungen von zahlreichen Forschern untersucht.

Fig. 263.



Die folgende Tafel enthält die Resultate von Regnault für Wasserdampf; S bedeutet die Spannung in Millimetern, T die Temperatur.

Von hohem Interesse ist die Dampfdichtebestimmung von Victor Meyer (1879), da iefelbe neben leichter und rascher Handhabung gestattet, Gase und Dämpfe bis zur hohen Delbgluth (über 1500°) zu erhitzen und die hierbei stattfindenden Veränderungen der Dichte u beobachten. Der Apparat für Temp. bis zu 300° ist in Fig. 264 abgebildet; b ist ein Glasgefäß (bei höherer Temp. Porzellan, bei höchster Temp. Platin), das im Dampfe der Heizflüssigkeit c hängt (Wasser, Anilin, Diphenylamin), bei höherer Temp. in einem Bade von geschmolzenem Blei, bei höchster in einem Gasofen. Ist die hinreichend hohe Temp. stabil geworden, so wird nach Oeffnung es Stöpsels d der dampfentwickelnde Körper in das Gefäß b, essen Boden mit Asbest bedeckt ist, eingeworfen und rasch wieer zugekorkt. Nach neueren Verbesserungen hängt der Körper m dem Stöpsel und wird nach Herstellung der Verdampfungsemp. durch eine Auslösungsvorrichtung herabgelassen. Durch ie Bildung des Dampfvol. v wird ein gleiches Luftvol. durch as Seitenröhrchen a getrieben, entweicht durch die Mündung ei f in das Wasser des Gefäßes g, steigt in dem ebenfalls mit Wasser gefüllten graduirten Meßcyl. auf und kann daher an essen Eintheilung abgelesen werden. Ist die Temp. des Wassers, also auch der Luft = t, die Spannung des dieser Temp. entprechenden Wasserdampfes = w und s das Gewicht der verampften Substanz, also auch des Dampfes, so ist die Dampfichte $= s \,.\, 760\,(1 + \alpha t) / 0{,}001293\,(b - w)\,v$. Die Temp. des Dampfes ist hiernach zur Bestimmung der Dichte nicht nothvendig, wohl aber, wenn man die Veränderung der Dichte mit er Temp. erforschen will; zu diesem Zwecke mißt man sie nach er calorimetrischen Methode durch Eintauchen eines Stückchens Platin in die Flüssigkeit (429.). Victor Meyer bestimmte nach einer Methode zunächst schon bekannte Dichten und fand mit iesen übereinstimmende Resultate, sobann die Dichten von Dämpfen mit sehr hohen Siedepunkten, die früher nicht genau bestimmt werden konnten, weil sie auch theils Queckſ. angreien, und zahlreiche andere Resultate, die wir sogleich bei der heoretischen Bestimmung der Dampfdichte und bei der Dichte überhitzter Dämpfe erwähnen werden. So ist die Dichte von Anilinbampf = 3,31, von Anthracendampf 6,01, von Chrysendampf 8,12, von Perchloriphenyl 17,43 (der schwerste von allen Dämpfen), Resultate, die mit den theoretischen ziemlich übereinstimmen.

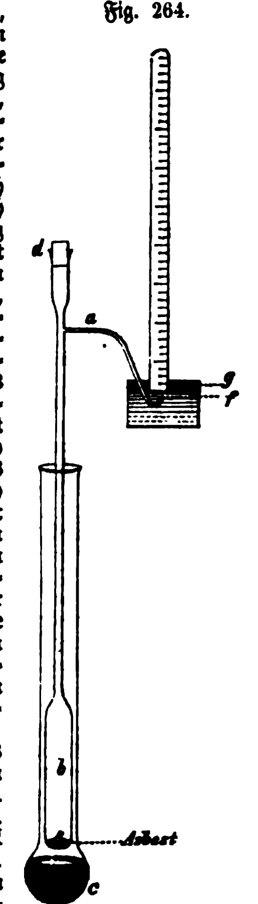


Fig. 264.

Theoretische Bestimmung der Dampfdichte. Aus er Chemie ist bekannt, daß die Gase sich meist in einfachen Volumverhältnissen mit einander vereinigen, und daß das Vol. er Verbindung in einfachem Verhältnisse steht zu den Vol. er Bestandtheile. So vereinigt sich 1 Vol. Cl mit 1 Vol. H u 2 Vol. HCl, ebenso 1 Vol. O mit 2 Vol. H zu 2 Vol. H^2O-Dampf. Es erklärt sich dies aus den 2 Avogadro'schen Gesetzen, daß gleiche Gasvolume gleich viele Gasmol. enthalten, und daß auch die Elemente in ihren Aetherhüllen nicht 1, sondern 2 At. einschließen. Die Vereinigung von 1 Vol. Cl mit 1 Vol. H besteht emnach darin, daß sich in jedes Mol., statt 2 At. Cl oder 2 At. H, ein At. Cl. und 1 At. I lagert; hierdurch findet keine Vermehrung oder Verminderung der Mol. und daher auch veder eine Vergrößerung noch eine Verkleinerung des Vol. statt. Bei der Vereinigung von 2 Vol. H und 1 Vol. O zu H^2O dagegen entstehen Mol., von denen jedes aus 2 At. H und 1 At. O besteht, also 3 At. statt wie vorher 2 enthält; es ist folglich die Zahl der Mol. nur $^2/_3$ von der unverbundenen Zahl und demnach das Verbindungsvol. $^2/_3$ von der Summe der unverbundenen Volumina. Nach jenen 2 Gesetzen verhalten sich die Gewichte gleicher Gasvolume wie ihre Molekulargewichte; demnach erhält man die Dichte eines elementaren Gases, indem man das spec. Gew. des Wasserstoffs mit dem Atomgewichte des Gases der Dampfes multiplicirt. Das spec. Gew. von H ist 0,0693, folglich ist das von O $= 0{,}0693 \,.\, 16 = 1{,}1088$, das von Cl $= 0{,}0693 \,.\, 35{,}5 = 2{,}458$, was mit den experimentell gefundenen Dichten dieser Gase übereinstimmt. Für chemisch zusammengesetzte Gase muß man durch die Zahl der entstehenden Vol. dividiren, um das Gewicht der Volumeneinheit zu finden. So entstehen durch Vereinigung von 2 Vol. H und 1 Vol. O 2 Vol. H^2O; folglich ist die Dampfdichte von $H^2O = {}^1/_2 \,.\, 0{,}0693 \,.\, 18 = 0{,}6237$, was mit Gaylussacs

Zahl stimmt. Durch diese theoretische Methode ist eine Correctur der practischen Bestimmung dargeboten; dieselbe erlaubt sogar die Bestimmung der Dampfdichte von Körpern, [illegible] noch gar nicht in Dampfform kennen, wenn nur gasförmige Verbindungen derselben [illegible]stiren, wie es z. B. beim Kohlenstoff der Fall ist. Wie bei der Bildung von [illegible] Verbindungsvol. doppelt so groß ist, als das Vol. jedes Bestandtheils, so ist auch [illegible] von CO doppelt so groß als von O, also auch doppelt so groß als das von C-Dampf; folglich hat man in CO 1 Vol. C-Dampf und 1 Vol. O. Es steht demnach die Dichte [illegible] hypothetischen C-Dampfes zur Dichte von O in dem Verhältnisse der Atomgewichte; [illegible] Dampfdichte von C = 1,1088 . 12/16 = 0,831.

Es ist leicht ersichtlich, daß man aus dem Satze, die Gewichte gleicher Gasvol. [illegible] die Dampfdichten verhalten sich wie die Molekulargewichte, nicht blos die Dampfdichten [illegible] stimmen kann, wenn die Molekulargewichte bekannt sind, sondern auch die Molekular- und Atomgewichte, wenn die Dampfdichten bekannt sind, und zwar die letzteren [illegible], indem man die Dampfdichten auf H = 1 bezieht. So sind die sp. G. von H, F, Cl, Br- und J-Dampf bezüglich 0,0693; 1,31; 2,44; 5,39; 8,71. Bezieht man dieselben auf H = 1, so erhält man 1, 19, 35,5, 80 und 127, die Atomgewichte der 5 Elemente. [illegible] sich auch das Atomgewicht eines Elementes bestimmen, wenn die Dampfdichten [illegible] Verbindungen desselben und der mit demselben verbundenen Elemente bekannt sind. [illegible] läßt sich aus der Dampfdichte die Richtigkeit chemischer Formeln beurtheilen. Hätte [illegible] arsenige Säure die bisher angenommene Fl. As_2O_3, so müßte theoretisch berechnet [illegible] Dampfdichte 6,84 sein, während Mitscherlich schon fand, daß sie bei 571° = 13,85 sei; [illegible] hielt dieses Resultat für unrichtig, weil die Temp. nicht hoch genug gewesen sei; [illegible] aber Victor Meyer (1879), daß bis 1500° die Dampfdichte so hoch sei, wodurch [illegible] ist, daß die Fl. As_4O_6 die richtige ist. Ebenso wurden für Kupferchlorür und [illegible] die gebräuchlichen Fln. Cu_2Cl_2 und $ZnCl_2$ als die richtigen erkannt, während für das Indiumchlorid statt der Fl. Jn_2Cl_6 die halbe Größe $JnCl_3$ gesetzt werden muß, [illegible] Indium als dreiwerthig erscheinen läßt, während man es bisher für vierwerthig hielt.

Wenn in dem Vorausgehenden die Dampfdichte als eine constante Größe [illegible] wurde, so darf dies doch nicht so aufgefaßt werden, als ob der Dampf eines Stoffes [illegible] allen Spannungen und Temp. bei gleichem Vol. dasselbe Gewicht habe; man hat [illegible] mehr für jeden Dampf von beliebiger Temp. und Spannung ein gleiches Vol. [illegible] gleicher Temp. und Spannung vorzustellen; dann ist das Gewicht des Dampfvol. [illegible] mal größer als das des Luftvol., als es die Dampfdichte angibt. Da aber ein [illegible] Luftvol. bei verschiedener Temp. und Spannung das verschiedenste Gewicht hat, so ist [illegible] das Gewicht eines und desselben Dampfvol. von sehr verschiedener Größe. Die ältere [illegible]thode, solche Dampfgew. zu berechnen, indem man das Gewicht 0,001 293 hv/(760 (1 + [illegible] eines Vol. Luft mit der Dampfdichte multiplicirte, liefert indessen selbst für überhitzte Dämpfe keine ganz richtigen Resultate, indem die Dampfdichte nicht ganz constant ist und in der Nähe der Sättigung etwas größer wird, was insbesondere für Ameisensäure von [illegible] für Essigsäure von Cahours und für Wasserdampf von Regnault nachgewiesen wurde; [illegible] weniger genau werden diese Resultate aber für gesättigte Dämpfe. So gibt Zeuner (1866) für das Gewicht von 1 cbm gesättigten Wasserdampfes bei 1 at 0,6059 kg, bei 2 at 1,[illegible] kg, bei 5 at 2,75 kg, bei 10 at 5,2703 kg nach den Resultaten der mechanischen Wärmetheorie, während nach der älteren Methode sich die Zahlen 0,5892, 1,1167, 2,5841 und 4,8[illegible] ergeben. Ebenso berechnet Clausius (1864) aus den Formeln der mechanischen Wärmetheorie das Vol. von 1 kg gesättigten Dampfes bei 58° = 8,23 cbm, bei 92° = 2,11 cbm, bei 124° = 0,7[illegible], bei 144° = 0,4370 cbm, welche Zahlen mit den neueren Versuchen von Fairbairn und [illegible] übereinstimmen, während die ältere Methode die Resultate ergibt 8,38, 2,16, 0,809, [illegible]. Man sieht aus diesen Angaben, daß die Abweichung mit der Temp. zunimmt, daß [illegible] die beiden Gesetze für gesättigten Dampf bei höherer Temp. immer weniger gelten. [illegible] diesen Zahlen ist weiter ersichtlich, daß, Dichte im gewöhnlichen Sinne gefaßt, der [illegible] Dampf bei höherer Temp. immer dichter wird; während 1 cbm gesättigten Wasserdampfes von 1/10 at Spannung nur 1/15 kg wiegt, hat dasselbe Vol. bei 14 at 7 kg Gewicht [illegible]

Die starke Abweichung gesättigter Dämpfe bei hoher Temp. von den beiden [illegible] zeigen besonders deutlich Cagniard de la Tours Versuche (1822). Derselbe hatte eine starke, zweischenkelige, vollständig geschlossene Glasröhre theilweise mit Queck. gefüllt, [illegible] welchem in dem kürzeren, weiteren, gefäßartigen Schenkel sich Wasser, Alkohol, [illegible] Schwefelkohlenstoff befand. Bei Temp. von bezüglich 400, 259, 200, 275° verschwanden die Flüssigkeiten, waren also in Dampf verwandelt, der das 2—3fache Vol. der Flüssigkeit [illegible]nahm und für die 3 letzten Flüssigkeiten Spannungen von 119, 37 und 38 at angenommen hatte. Nun läßt sich aber leicht berechnen, daß z. B. das spec. Gew. des Aetherdampfes, dessen Dichte = 2,586 ist, in Bezug auf Wasser bei einer Temp. von 200° etwa 0,0[illegible] beträgt, während in Cagniards Versuchen das spec. Gew. gleich der Hälfte von dem des Aethers, also = 0,355 war, gewiß eine bedeutende Abweichung (425.).

Wie in einem gaserfüllten Raume die Spannung eines Dampfes gleich derjenigen in einem leeren Raume von gleicher Temp. ist, so hat auch die Dampfdichte in einem gaserfüllten Raume z. B. in der Luft nahezu denselben Werth wie im leeren Raume; wenigstens für den Wasserdampf darf man bei Temp., wie sie in unserem Klima vorkommen, die Dichte in der Luft nach Regnault = 0,625 festhalten, was für die Berechnung der Feuchtigkeit der Luft von Wichtigkeit ist. Erheblicher sind nach Regnault die Abweichungen bei flüchtigeren Flüssigkeiten.

417 **Spannung und Dichte überhitzter Dämpfe.** Sehr stark überhitzte Dämpfe, die jenseits des Uebergangszustandes liegen, verhalten sich wie vollkommene Gase; für sie gilt also das Mariotte-Gay-Lussac'sche Gesetz $vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t)$. Bleibt der Druck p derselbe, geschieht also die Erhitzung an freier Luft, so ist $v = v_0 (1 + \alpha t)$, das Vol. nimmt für jeden Grad um α oder $1/273$ zu. Bleibt das Vol. dasselbe, ist also der Dampf eingeschlossen, so ist $p = p_0 (1 + \alpha t)$, die Spannung nimmt für jeden Grad um $1/273$ zu. Setzt man in der Fl. für α seinen Werth 0,003665 oder $1/273$, so ist $pv = p_0 v_0 \alpha (273 + t)$ oder $pv = BT$, worin B das constante Product $p_0 v_0 \alpha$ und T die absolute Temperatur $273 + t$ bedeutet.

Für den Uebergangszustand nun gilt dieses Gesetz nicht; die Untersuchungen Zeuners (1866) geben dagegen für schwach überhitzte Wasserdämpfe folgendes Gesetz $pv = BT - C \sqrt{p}$, worin die Constante $B = 0,0049287$ und die Constante $C = 0,18781$. Nach den Versuchen von Hirn stimmen die Resultate dieser Formel mit den Ergebnissen der Erfahrung. Die Eigenschaften der überhitzten Dämpfe werden neuerdings wichtig, weil man in manchen Dampfmaschinen überhitzte Wasserdämpfe anwendet, um Brennstoff zu sparen.

Berechnet man z. B. für überhitzten Dampf von 200° bei 3, 4 und 5at Spannung aus Zeuners Formel das Vol. v von 1kg Dampf, so ergeben sich 0,6947cbm, 0,5164cbm und 0,4150cbm, während Hirns Versuche 0,697cbm, 0,522cbm, 0,414cbm ergeben, eine so kleine Abweichung, daß sie in die Grenzen der Beobachtungs- und Rechnungsungenauigkeiten fällt. — Neuere Autoren bezeichnen das angegebene Vol. von 1kg Dampf in cbm mit dem Namen des spec. Dampfvolumens, welcher in der älteren Mechanik eine etwas andere Bedeutung hatte; man verstand nämlich unter dem spec. Dampfvolumen die Zahl, welche anzeigt, wieviel mal so groß das Vol. des Dampfes ist als dasjenige des Wassers, aus welchem er sich gebildet hat; für Dampf von 1at ist dieses spec. Volumen = 1700, für Dampf von 2at nahezu = 900. Ebenso versteht Zeuner auch unter Dichtigkeit des Dampfes nicht den in 416. besprochenen Begriff, sondern das Gewicht von 1cbm Dampf in kg, eine Verschiedenheit, welche der Aufmerksamkeit der Studirenden zu empfehlen ist.

Die Dichte überhitzter Dämpfe weicht häufig bei höherer Temperatur in entgegengesetzter Weise vom Mariotte'schen Gesetze ab, wie die der gesättigten Dämpfe, sie wird nämlich bei manchen Dämpfen kleiner, und zwar deßhalb, weil dieselben anfänglich dissociirt und schließlich vollkommen in einfachere Moleküle zersetzt werden.

In 62. wurden schon einige Beispiele dieser abnormen Dampfdichten betrachtet. Victor Meyer hat (1880) dieselben bedeutend vermehrt, sogar für Gase. So ist die Dampfdichte des Zinnchlorürs $SnCl_2$ theoretisch = 6,53; Meyer fand aber nur für hohe Temp. nahe liegende Zahlen, für 600° aber das doppelte derselben, während sie bei steigender Temp. abnehmen; hieraus schließt er, daß dieser Dampf in 2 Modificationen existire, für 600° als Sn_2Cl_4, für 1000 aber als $SnCl_2$; in dem Intervall wird der Dampf bei steigender Temp. immer mehr dissociirt und endlich bei 1000° jedes Mol. Sn_2Cl_4 in 2 Mol. $SnCl_2$ gespalten. Von Interesse sind die Forschungen von V. M. über Chlorgas, Brom- und Joddampf; von 200 bis 600° blieb die Dichte des Joddampfes constant = 8,78, gleich der theoretischen; von hier an aber nahm sie ab und erreichte bei 1000° etwa 5,8. Die weiteren Ergebnisse der älteren Arbeit von V. M. waren unsicher; Crafts und F. Meyer dagegen gelangten durch höhere Erhitzung zu einem Joddampfe von 5,1 Dichte. In Folge dessen nahm V. M. bei verbesserten Heizeinrichtungen und vollkommeneren App. mit mehreren Mitarbeitern seine Forschungen wieder auf und erreichte bei 1400° eine Dichte des Joddampfes von 4,5, die Hälfte der theoretischen Dichte, die nach Crafts und F. Meyer bis 1700° keine Veränderung mehr zeigt. Auch über Brombampf und Chlorgas setzt V. M. seine Forschungen fort und constatirte (1884) daß die Dichte des Brombampfes bis 900° normal = 5,5 bleibt, während bei 1200° schon Dissociation eingetreten ist, indem bei dieser Temp. die Dichte des Brombampfes nur 4,3 beträgt und bei 1450° auf 3,4 sinkt. Das Chlorgas behält seine theoretische Dichte 2,45 bis 1200° bei; hier scheint aber die Dissociation zu beginnen, indem die Chlordichte bei 1450° auf 2,02 herabgeht. Für O und H blieb die Gasdichte auch bei den höchsten Temp. immer dieselbe; diese Gase werden also durch die bis jetzt angewandten Hitzegrade nicht dissociirt, ihre Mol. bleiben O_2 und N_2; auch der Quecksilberdampf behält

Zahl stimmt. Durch diese theoretische Methode ist eine Correctur der practischen Bestimmung dargeboten; dieselbe erlaubt sogar die Bestimmung der Dampfdichte von Körpern, die wir noch gar nicht in Dampfform kennen, wenn nur gasförmige Verbindungen derselben [illegible] stiren, wie es z. B. beim Kohlenstoff der Fall ist. Wie bei der Bildung von [illegible] Verbindungsvol. doppelt so groß ist, als das Vol. jedes Bestandtheils, so ist auch das [illegible] von CO doppelt so groß als von O, also auch doppelt so groß als das von C-Dampf; folglich hat man in CO 1 Vol. C-Dampf und 1 Vol. O. Es steht demnach die Dichte des hypothetischen C-Dampfes zur Dichte von O in dem Verhältnisse der Atomgewichte; die Dampfdichte von C = 1,1088 . 12/16 = 0,831.

Es ist leicht ersichtlich, daß man aus dem Satze, die Gewichte gleicher Gasvol. [illegible] die Dampfdichten verhalten sich wie die Molekulargewichte, nicht blos die Dampfdichten bestimmen kann, wenn die Molekulargewichte bekannt sind, sondern auch die Molekular- und Atomgewichte, wenn die Dampfdichten bekannt sind, und zwar die letzteren einfach, indem man die Dampfdichten auf H = 1 bezieht. So sind die sp. G. von H, F, Cl, Br- und J-Dampf bezüglich 0,0693; 1,31; 2,44; 5,39; 8,71. Bezieht man dieselben auf H = 1, so erhält man 1, 19, 35,5, 80 und 127, die Atomgewichte der 5 Elemente. [illegible] sich auch das Atomgewicht eines Elementes bestimmen, wenn die Dampfdichten flüchtiger Verbindungen desselben und der mit demselben verbundenen Elemente bekannt sind. [illegible] läßt sich aus der Dampfdichte die Richtigkeit chemischer Formeln beurtheilen. Hätte z. B. arsenige Säure die bisher angenommene Fl. As_2O_3, so müßte theoretisch [illegible] Dampfdichte 6,84 sein, während Mitscherlich schon fand, daß sie bei 571° = 13,85 sei; man hielt dieses Resultat für unrichtig, weil die Temp. nicht hoch genug gewesen sei; [illegible] aber Victor Meyer (1879), daß bis 1500° die Dampfdichte so hoch sei, wodurch [illegible] ist, daß die Fl. As_4O_6 die richtige ist. Ebenso wurden für Kupferchlorür und [illegible] die gebräuchlichen Fln. Cu_2Cl_2 und $ZnCl_2$ als die richtigen erkannt, während für das Indiumchlorid statt der Fl. Jn_2Cl_6 die halbe Größe $JnCl_3$ gesetzt werden muß, [illegible] Indium als dreiwerthig erscheinen läßt, während man es bisher für vierwerthig hielt.

Wenn in dem Vorausgehenden die Dampfdichte als eine constante Größe [illegible] wurde, so darf dies doch nicht so aufgefaßt werden, als ob der Dampf eines Stoffes [illegible] allen Spannungen und Temp. bei gleichem Vol. dasselbe Gewicht habe; man hat sich [illegible] mehr für jeden Dampf von beliebiger Temp. und Spannung ein gleiches Vol. [illegible] gleicher Temp. und Spannung vorzustellen; dann ist das Gewicht des Dampfvol. [illegible] mal größer als das des Luftvol., als es die Dampfdichte angibt. Da aber ein und [illegible] Luftvol. bei verschiedener Temp. und Spannung das verschiedenste Gewicht hat, so [illegible] das Gewicht eines und desselben Dampfvol. von sehr verschiedener Größe. Die [illegible] thode, solche Dampfgew. zu berechnen, indem man das Gewicht 0,001293 bv/(760 (1 + [illegible] eines Vol. Luft mit der Dampfdichte multiplicirte, liefert indessen selbst für überhitzte [illegible] keine ganz richtigen Resultate, indem die Dampfdichte nicht ganz constant ist und in der Nähe der Sättigung etwas größer wird, was insbesondere für Ameisensäure von [illegible] für Essigsäure von Cahours und für Wasserdampf von Regnault nachgewiesen wurde; [illegible] weniger genau werden diese Resultate aber für gesättigte Dämpfe. So gibt Zeuner [illegible] für das Gewicht von 1cbm gesättigten Wasserdampfes bei 1at 0,6059kg, bei 2at [illegible] bei 5at 2,75kg, bei 10at 5,2703kg nach den Resultaten der mechanischen Wärmetheorie, während nach der älteren Methode sich die Zahlen 0,5892, 1,1167, 2,5841 und 4,8[illegible] ergeben. Ebenso berechnet Clausius (1864) aus den Formeln der mechanischen Wärmetheorie [illegible] Vol. von 1kg gesättigten Dampfes bei 58° = 8,23cbm, bei 92° = 2,11cbm, bei 124° = [illegible] bei 144° = 0,4370cbm, welche Zahlen mit den neueren Versuchen von Fairbairn und [illegible] übereinstimmen, während die ältere Methode die Resultate ergibt 8,38, 2,16, 0,80[illegible] [illegible] Man sieht aus diesen Angaben, daß die Abweichung mit der Temp. zunimmt, daß die beiden Gesetze für gesättigten Dampf bei höherer Temp. immer weniger gelten. [illegible] diesen Zahlen ist weiter ersichtlich, daß, Dichte im gewöhnlichen Sinne gefaßt, der [illegible] Dampf bei höherer Temp. immer dichter wird; während 1cbm gesättigten Wasser[illegible] von 1/10at Spannung nur 1/15kg wiegt, hat dasselbe Vol. bei 14at 7kg Gewicht [illegible]

Die starke Abweichung gesättigter Dämpfe bei hoher Temp. von den beiden [illegible] zeigen besonders deutlich Cagniard de la Tours Versuche (1822). Derselbe hatte [illegible] starke, zweischenkelige, vollständig geschlossene Glasröhre theilweise mit Queckſ. [illegible] welchem in dem kürzeren, weiteren, gefäßartigen Schenkel sich Wasser, Alkohol, [illegible] Schwefelkohlenstoff befand. Bei Temp. von bezüglich 400, 259, 200, 275° versch[illegible] Flüssigkeiten, waren also in Dampf verwandelt, der das 2—3fache Vol. der Flüssig[illegible] nahm und für die 3 letzten Flüssigkeiten Spannungen von 119, 37 und 39at an[illegible] hatte. Nun läßt sich aber leicht berechnen, daß z. B. das spec. Gew. des Aether[illegible] dessen Dichte = 2,586 ist, in Bezug auf Wasser bei einer Temp. von 200° etwa [illegible] trägt, während in Cagniards Versuchen das spec. Gew. gleich der Hälfte von [illegible] Aethers, also = 0,355 war, gewiß eine bedeutende Abweichung (425.).

Wie in einem gaserfüllten Raume die Spannung eines Dampfes gleich derjenigen in :inem leeren Raume von gleicher Temp. ist, so hat auch die Dampfdichte in einem gas- :rfüllten Raume z. B. in der Luft nahezu denselben Werth wie im leeren Raume; wenig- tens für den Wasserdampf darf man bei Temp., wie sie in unserem Klima vorkommen, die Dichte in der Luft nach Regnault = 0,625 festhalten, was für die Berechnung der Feuchtig- eit der Luft von Wichtigkeit ist. Erheblicher sind nach Regnault die Abweichungen bei lüchtigeren Flüssigkeiten.

Spannung und Dichte überhitzter Dämpfe. Sehr stark überhitzte Dämpfe, 417 ie jenseits des Uebergangszustandes liegen, verhalten sich wie vollkommene Gase; ür sie gilt also das Mariotte-Gaylussac'sche Gesetz $vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t)$. Bleibt er Druck p derselbe, geschieht also die Erhitzung an freier Luft, so ist $v = v_0$ 1 $+ \alpha t)$, das Vol. nimmt für jeden Grad um α oder $1/273$ zu. Bleibt das Vol. asselbe, ist also der Dampf eingeschlossen, so ist $p = p_0 (1 + \alpha t)$, die Spannung immt für jeden Grad um $1/273$ zu. Setzt man in der Fl. für α seinen Werth),003665 oder $1/273$, so ist $pv = p_0 v_0 \alpha (273 + t)$ oder $pv = BT$, worin B as constante Product $p_0 v_0 \alpha$ und T die absolute Temperatur $273 + t$ bedeutet.

Für den Uebergangszustand nun gilt dieses Gesetz nicht; die Untersuchungen Zeuners 1866) geben dagegen für schwach überhitzte Wasserdämpfe folgendes Gesetz $pv = BT - C \sqrt{p}$, vorin die Constante $B = 0{,}0049287$ und die Constante $C = 0{,}18781$. Nach den Versuchen on Hirn stimmen die Resultate dieser Formel mit den Ergebnissen der Erfahrung. Die Eigenschaften der überhitzten Dämpfe werden neuerdings wichtig, weil man in manchen Dampfmaschinen überhitzte Wasserdämpfe anwendet, um Brennstoff zu sparen.

Berechnet man z. B. für überhitzten Dampf von 200° bei 3, 4 und 5^at^ Spannung us Zeuners Formel das Vol. v von 1^kg^ Dampf, so ergeben sich 0,6947^cbm^, 0,5164^cbm^ ınd 0,4150^cbm^, während Hirns Versuche 0,697^cbm^, 0,522^cbm^, 0,414^cbm^ ergeben, eine so leine Abweichung, daß sie in die Grenzen der Beobachtungs- und Rechnungsungenauigkeiten ällt. — Neuere Autoren bezeichnen das angegebene Vol. von 1^kg^ Dampf in cbm mit dem Namen des spec. Dampfvolumens, welcher in der älteren Mechanik eine etwas andere Be- eutung hatte; man verstand nämlich unter dem spec. Dampfvolumen die Zahl, welche nzeigt, wieviel mal so groß das Vol. des Dampfes ist als dasjenige des Wassers, aus velchem er sich gebildet hat; für Dampf von 1^at^ ist dieses spec. Volumen = 1700, für Dampf von 2^at^ nahezu = 900. Ebenso versteht Zeuner auch unter Dichtigkeit des Dampfes nicht den in 416. besprochenen Begriff, sondern das Gewicht von 1^cbm^ Dampf in kg, eine Verschiedenheit, welche der Aufmerksamkeit der Studirenden zu empfehlen ist.

Die Dichte überhitzter Dämpfe weicht häufig bei höherer Temperatur in ent- gegengesetzter Weise vom Mariotte'schen Gesetze ab, wie die der gesättigten Dämpfe, ie wird nämlich bei manchen Dämpfen kleiner, und zwar deßhalb, weil dieselben nfänglich dissociirt und schließlich vollkommen in einfachere Moleküle zersetzt werden.

In 62. wurden schon einige Beispiele dieser abnormen Dampfdichten betrachtet. Victor Meyer hat (1880) dieselben bedeutend vermehrt, sogar für Gase. So ist die Dampf- ichte des Zinnchlorürs $SnCl_2$ theoretisch = 6,53; Meyer fand aber nur für hohe Temp. nahe liegende Zahlen, für 600° aber das doppelte derselben, während sie bei steigender Temp. abnehmen; hieraus schließt er, daß dieser Dampf in 2 Modificationen existire, für 300° als Sn_2Cl_4, für 1000 aber als $SnCl_2$; in dem Intervall wird der Dampf bei stei- zender Temp. immer mehr dissociirt und endlich bei 1000° jedes Mol. Sn_2Cl_4 in 2 Mol. $SnCl_2$ gespalten. Von Interesse sind die Forschungen von V. M. über Chlorgas, Brom- ınd Joddampf; von 200 bis 600° blieb die Dichte des Joddampfes constant = 8,78, gleich er theoretischen; von hier an aber nahm sie ab und erreichte bei 1000° etwa 5,8. Die wei- eren Ergebnisse der älteren Arbeit von V. M. waren unsicher; Crafts und F. Meyer da- egen gelangten durch höhere Erhitzung zu einem Joddampfe von 5,1 Dichte. In Folge dessen ahm V. M. bei verbesserten Heizeinrichtungen und vollkommeneren App. mit mehreren Mit- rbeitern seine Forschungen wieder auf und erreichte bei 1400° eine Dichte des Joddampfes on 4,5, die Hälfte der theoretischen Dichte, die nach Crafts und F. Meyer bis 1700° keine Veränderung mehr zeigt. Auch über Brombampf und Chlorgas setzt V. M. seine Forschungen ort und constatirte (1884) daß die Dichte des Brombampfes bis 900° normal = 5,5 bleibt, während bei 1200° schon Dissociation eingetreten ist, indem bei dieser Temp. die Dichte des Brombampfes nur 4,3 beträgt und bei 1450° auf 3,4 sinkt. Das Chlorgas behält seine theoretische Dichte 2,45 bis 1200° bei; hier scheint aber die Dissociation zu beginnen, indem ie Chlordichte bei 1450° auf 2,02 herabgeht. Für O und H blieb die Gasdichte auch bei en höchsten Temp. immer dieselbe; diese Gase werden also durch die bis jetzt angewandten Hitzegrade nicht dissociirt, ihre Mol. bleiben O_2 und N_2; auch der Quecksilberdampf behält

seine Dichte unverändert bei, was die Anschauung bestätigt, daß dieses Element keine Mol. bildet, sondern in Atome aufgelöst existirt.

418 **Der Siedepunkt** (Dalton 1801) ist diejenige Temperatur, bei welcher in einer Flüssigkeit Dampfblasen aufsteigen und das für das Kochen oder Sieden characteristische Aufwallen veranlassen. Da die Temperatur der siedenden Flüssigkeit häufig nicht mit der des entstehenden Dampfes übereinstimmt, und da die letztere viel unabhängiger von Nebenumständen ist als die erstere, so ist man übereingekommen, den Siedepunkt durch die Temperatur auszudrücken, welche ein in den Dämpfen hängendes Thermometer angibt, vorausgesetzt, daß dasselbe vor fremden Einflüssen geschützt ist. Der Siedepunkt ist für verschiedene Flüssigkeiten unter sonst gleichen Umständen verschieden, er liegt im Allgemeinen um so tiefer, je leichter verdampfbar, je flüchtiger die Flüssigkeit ist. Für eine und dieselbe Flüssigkeit, vorausgesetzt, daß sich in derselben Gasbläschen befinden, hängt der Siedepunkt in erster Linie von dem äußeren Drucke ab, welcher durch Luft, Dampf oder drgl. auf die Flüssigkeit ausgeübt wird. Dieser Einfluß des äußeren Druckes ist in folgendem Gesetze ausgesprochen: Der Siedepunkt ist gleich derjenigen Temperatur, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleichkommt. Demnach ist der Siedepunkt einer und derselben Flüssigkeit sehr veränderlich; spricht man von dem Siedepunkte kurzweg, so wird gewöhnlich das Vorhandensein des Druckes von $1^{at} = 760^{mm}$ Quecksilber vorausgesetzt, sowie das Vorhandensein von Luftbläschen in der Flüssigkeit. Sind solche Luftbläschen nicht vorhanden (Dufour 1864), können dieselben nicht aus den porösen Unreinigkeiten der Gefäßwände sich entwickeln (Schröder 1870), so wird der Siedepunkt bedeutend erhöht. Die Temperatur der Flüssigkeit ist immer etwas höher als die des Dampfes; diese Erhöhung hängt ab von der Beschaffenheit der Gefäßwände, von der Höhe der Flüssigkeit und von dem Widerstande der Flüssigkeitshaut, also auch von der Cohäsion der Flüssigkeit. Lösungen von nicht flüchtigen festen Körpern sieden erst bei höherer Erhitzung als das reine Lösungsmittel und entwickeln auch Dampf von höherer Temperatur, aber von derselben Spannung als das Lösungsmittel (Magnus 1862). Gemenge mischbarer Flüssigkeiten haben einen Siedepunkt zwischen den Siedepunkten der Gemengtheile, der einem derselben um so näher kommt, je mehr das Gemenge von diesem Gemengtheile enthält. Merkwürdig sind die Untersuchungen Kopps (1855) über die Siedepunkte homologer Reihen, d. i. solcher organischer Verbindungen, deren moleculare Zusammensetzung sich um ein und dasselbe Molekül von Kohlenstoff und Wasserstoff unterscheidet; Kopp fand nämlich, daß einer und derselben Zusammensetzungsdifferenz auch sehr oft dieselbe Siedepunktsdifferenz entspricht. — In allzuheißen Gefäßen sieden geringe Mengen von Flüssigkeit gar nicht (s. d. sphäroidalen Zustand).

Siedepunkte einiger Flüssigkeiten bei 760^{mm} Druck.

Blei	1450°	Leinöl	316°	Benzol	80,4°
Zink	930	Terpentinöl	293	Alkohol	78,3
Cadmium	770	Benzoeäther	209	Essigäther	74,3
Brom	700	Jod	175	Holzeist	65,5
Selen	680	Zinnchlorid	120	Schwefelkohlenstoff	46,6
Schwefel	450	Wasser	100	Aether	34,9
Stearin	380	Salpetersäure	86	Aldehyd	20,8
Quecksilber	360	Steinöl	05	Chlorwasserstoffäther	11
Schwefelsäure	325				

Wird der Druck geringer, so wird der Siedepunkt niedriger. Wasser siedet auf dem Chimborasso bei 77°, auf dem Montblanc bei 85°, auf dem St. Bernhard bei 92°. Der Siedepunkt kann aus der Tabelle 114. entnommen werden; unter einem bestimmten Drucke ist immer der Siedepunkt gleich der Temp. T, welche neben der dem Drucke gleichen Spannung S steht; so ist er bei $\frac{1}{2}^{at} = 82°$, bei $\frac{1}{4}^{at} = 65°$, bei $0{,}1^{at} = 46°$, bei $\frac{1}{20}^{at} = 33°$, bei $0{,}01^{at} = 7°$, bei $4{,}6^{mm} = 0°$; Wasser siedet also selbst bei 0°, wenn nur der Luft-

druck gering genug ist; auch Eis wird unter diesem Drucke von 4,6° sofort in Dampf verwandelt, schmilzt also nicht, wodurch die Sage vom heißen Eis entstand. Von dieser Erniedrigung des Siedepunktes überzeugt man sich durch Luftpumpenversuche; unter der ausgepumpten Glocke kocht Wasser bei gewöhnlicher Temp. Auch folgender Versuch gibt einen einfachen Nachweis. Man bringt Wasser in einem Kochfläschchen zu lebhaftem Sieden, verkorkt dasselbe dann rasch und kehrt es um (Fig. 265): noch ½ Stunde später fängt es immer wieder an zu kochen, wenn man durch Aufgießen von kaltem Wasser die entstandenen Dämpfe durch Condensation beseitigt und so über dem Wasser einen luftverdünnten Raum schafft. Auch der Wasserhammer und der Pulshammer sind leicht verständliche Nachweise. Man benutzt dieses frühere Kochen bei geringerem Drucke in den Zuckerfabriken, wo man den Zuckersaft in den Vacuumpfannen mit Anwendung geringerer Temp. concentrirt, sowie auch zum Höhenmessen mittels des Thermophypsometers; dasselbe gibt die Temp. an, bei welcher in einer gewissen Höhe das Wasser siedet; aus der Differenz der Siedepunkte erhält man nach Remy die betreffende Höhe, wenn man jene Differenz mit 291^{m} multiplicirt.

Fig. 265.

Wird der Druck stärker, so wird der Siedepunkt erhöht. Für das Wasser ergibt die Tabelle 414., daß es unter 2^{at} bei 120°, unter 3^{at} bei 135°, unter 4^{at} bei 145°, unter 8^{at} bei 170°, unter 16^{at} bei 200° siedet. Von diesen Siedepunkterhöhungen überzeugt man sich durch Versuche mit dem Papin'schen Topf Fig. 263. Mit einem solchen Sparkochtopfe kann man auch auf hohen Bergen Fleisch gar kochen, sowie Stoffe extrahiren, die bei offenem Kochen kein Extract liefern, außerdem das gewöhnliche Kochen rascher und billiger vornehmen u. s. w. Für Hochdruckdampfmaschinen hat das Kesselwasser eine höhere Temp. als 100°, weil der Dampf eine Spannung von mehreren At. haben muß. Tritt in einem solchen hochgespannten Kessel plötzlich eine Druckverminderung ein, z. B. durch Oeffnen des Sicherheitsventiles oder durch Entstehung eines Risses in der Kesselwand, so verwandelt sich eine große Menge des hocherhitzten Wassers plötzlich in Dampf, worin nach Kayser (1865) eine Ursache der Dampfkesselexplosionen zu suchen ist. — Durch eine ähnliche Wirkung von hocherhitzten Dämpfen erklärt Bunsen (1846) die intermittirenden Ausbrüche des großen Geiser und des Strokr auf der Insel Island.

Warum der Siedepunkt gleich derjenigen Temp. ist, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleich kommt, geht aus der in 410. vorgetragenen Theorie der Verdampfung hervor. Der Dampf kann nur dann die kleinen Luftbläschen zu Dampfblasen erweitern, wenn seine Spannung den auf diesen Bläschen lastenden Druck überwinden kann; da neben dem äußeren Luft- oder Dampfdrucke auch noch der Druck der über den Bläschen lastenden Flüssigkeitsäule einwirkt, so muß die Temp. der Flüssigkeit in den tieferen Schichten um einen geringen Grad höher sein als die des Dampfes, der oben abströmt. Das Vorhandensein solcher Luftbläschen ist hiernach unumgänglich nöthig, wenn eine Flüssigkeit bei ihrem dem äußeren Drucke entsprechenden Siedepunkte kochen soll; fehlen die Luftbläschen, so wird die Flüssigkeit auch bei erreichtem Siedepunkte nicht sieden. Sie kann alsdann erst bei einer höheren Temp. zum Sieden kommen, wo die leb. Kft. der Mol. so gewachsen ist, daß durch ein günstiges Zusammentreffen der schwingenden, wälzenden und fortschreitenden Bewegung sich mehrere Mol. auseinander werfen und dadurch selbst ein Dampfbläschen bilden; dieses wird sich dann sofort vergrößern, aufsteigen, zertheilen, und so zur Bildung zahlreicher Dampfblasen, zur plötzlichen Erzeugung einer großen stoßenden Dampfmenge Anlaß geben. Die Erhöhung des Siedepunktes, welche durch Luftentziehung erzeugt wird, nennt man Siedeverzug (Dufour 1864) und die Flüssigkeit, die über ihren Siedepunkt hinaus erwärmt ist, eine überhitzte Flüssigkeit. Dufour benutzte zu seinen Versuchen eine Retorte, durch deren Tubulus ein Therm. in die Flüssigkeit ging, und an deren Hals eine kühl gehaltene Blechvorlage mit einer Luftpumpe communicirte. Wurde nun nach dem Kochen der Flüssigkeit der Dampf mit der Vorsicht weggepumpt, daß die Flüssigkeit keine Erschütterung erlitt, so blieb das Sieden derselben aus, wenn auch der Druck weit unter die Spannung erniedrigt war, welche der Temp. der Flüssigkeit entsprach. Je öfter das Wasser gekocht war, desto stärker konnte der Siedeverzug werden; die geringste Erschütterung brachte dann aber ein heftiges, stoßweises Sieden hervor, ebenso Gasentwickelung in der Flüssigkeit durch Wasserzersetzung mittels zweier vorher schon eingeführten Poldrähte, ebenso plötzliche Erhitzung oder eine plötzliche noch viel weiter gehende Druckverminderung. In ähnlicher Weise mögen manche Dampfkessel-Explosionen entstehen; nach dem Abstellen einer Dampfmasch. kühlt sich allmälig der Dampf ab und condensirt sich, während das Wasser noch heiß bleibt und wegen seiner Luftarmuth und der ringsum herrschenden Ruhe einen Siedeverzug erfährt. Wird nun die Masch. in Gang gesetzt, so entsteht eine stoßweise, massenhafte *Dampfentwickelung, wodurch der Kessel* zerstört werden kann. Nach Schröder (1870) ist die

im Wasser gelöste Luft nicht fähig, die nöthigen Luftbläschen zu bilden, da dieselbe durch die Lösung in den flüssigen Zustand versetzt sei. Diese Behauptung wird allerdings durch einen Versuch Dufours bestätigt; Leinöl wurde mit Nellenöl zu einer Flüssigkeit von dem spec. Gew. kochend heißen Wassers gemischt und in dieser Mischung eine kleine, sehr lufthaltige Wasserkugel bis zu 178° erhitzt, ohne daß dieselbe sich in Dampf verwandelte; wurde aber der Tropfen mit einem festen Körper berührt, so entstand sofort eine rasche Verdampfung. Es ist also nicht die im Wasser gelöste Luft, welche das Sieden befördert, sondern die in den Poren der an den Gefäßwänden abhärirenden Unreinigkeiten vorhandene Luft, welche die nöthigen Luftbläschen bildet; ganz entsprechend ist die allgemein bekannte Erscheinung, daß das Kochen an den Gefäßwänden beginnt, sowie die Beobachtung von Marcet (1846), daß die Beschaffenheit der Gefäßwände einen wesentlichen Einfluß auf die Temp. der siedenden Flüssigkeiten ausübt. So siedet Wasser in Metallgefäßen eher als in gläsernen, und wird auch in den letzteren die Siedetemp. erniedrigt, wenn man Eisenfeilspäne in das Wasser wirft; früher meinte man, die Ursache liege in der größeren Adhäsion des Wassers gegen das Glas; jetzt sieht man dieselbe in der größeren Luftmenge, welche den Metallen adhärirt, was noch insbesondere dadurch bekräftigt wird, daß eine stärkere Reinigung von Glasgefäßen mit Schwefelsäure oder ein Ueberziehen derselben mit Gummilack die Siedetemp. des Wassers um mehrere Grade erhöht.

Daß die Siedetemp. von Lösungen fester Körper höher ist als die des reinen Lösungsmittels, erklärt man dadurch, daß die Anziehung der Theilchen des festen Körpers gegen die Flüssigkeitstheilchen größer ist, als die Anziehung der Flüssigkeitstheilchen unter sich; hieraus folgt denn auch, daß die Erhöhung mit dem Gehalte der Lösung wächst, ohne indessen derselben genau proportional zu sein. Nach Legrand (1836) siedet eine wässerige Lösung von 8% Kochsalzgehalt bei 101°, von 40% bei 108°, eine Lösung von 9% Natriumsalpeter bei 101°, von 212% bei 120°. Der hierbei entstehende Dampf ist reiner Wasserdampf, wenn wie in diesen Beispielen der gelöste Körper nicht flüchtig ist; er ist heißer als 100°, weil er in das heißere Wasser eingebettet war; er hat aber nur eine Spannung gleich dem äußeren Drucke, wie sie der Dampf von 100° besitzt, weil wegen der Anziehung der Salztheilchen die Dampfmenge geringer ist als über reinem Wasser, und weil sonach die durch die höhere Temp. veranlaßte Spannungserhöhung durch die geringere Dampfmenge aufgehoben wird.

In ähnlicher Weise wird der Siedepunkt einer Flüssigkeit erhöht durch Zumischung einer mit derselben mischbaren weniger flüchtigen Flüssigkeit und erniedrigt durch Zumischung einer flüchtigeren Flüssigkeit. Nach Alluard (1864) siedet ein Gemisch von 300g Schwefelkohlenstoff mit 150g Aether bei 38°, mit 15g Aether bei 45°; ebenso Wasser mit 66% Alkohol bei 83°, mit 10% bei 90°, mit 2% bei 97°; geringe Beimischung ändert den Siedepunkt nicht. Nach der gewöhnlichen Anschauung siedet bei dem Siedepunkte eines Gemisches nur der flüchtigere Gemengtheil, reißt aber Dämpfe des anderen in geringer Menge mit fort; wird dieses abgeströmte Dampfgemenge abgekühlt, so erhält man eine Flüssigkeit mit reicherem Gehalte von dem flüchtigeren Stoffe. Hierauf beruht die Trennung von Gemengen durch Destillation, wie z. B. die Branntwein- und Spiritusbereitung. Da das zurückbleibende Gemenge reicher an der weniger flüchtigen Substanz ist, so erhöht sich der Siedepunkt des Gemenges fortwährend. Nach Alluard ist die Trennung durch Destillation unmöglich, wenn das Gemisch nur einen gewissen, geringen Bruchtheil der einen Flüssigkeit enthält; das Gemenge siedet dann als solches. Dies ist auch der Fall, wenn die Stoffe ein Gemisch nach festen Verhältnissen bilden, was nach Berthelot (1863) geschieht, wenn die Spannung der Dämpfe der Dichte derselben umgekehrt proportional ist. So läßt sich ein Gemenge von 8% Wasser und 92% Alkohol nicht durch Sieden zerlegen, ebenso nicht das Gemisch von 8% Alkohol und 92% Schwefelkohlenstoff; ein Gemenge von 9% Alkohol und 91% Schwefelkohlenstoff hat einen constanten Siedepunkt von 43°. Das Gemisch hat in solchen Fällen etwas von der Beständigkeit chemischer Verbindungen, ohne indessen eine atomistische Zusammensetzung zu besitzen. — Auch der Fall kommt vor, daß das Gemisch einen höheren Siedepunkt als die beiden Bestandtheile hat; beim Sieden entweicht dann der überschüssige Bestandtheil bis zu einem gewissen festen Mischungsverhältnisse, das dann als solches einen constanten Siedepunkt hat. So entweicht bei dem Kochen von wässeriger Salzsäure unter fortwährendem Steigen des Siedepunktes Wasser, bei dem Kochen von starker Salzsäure ebenfalls unter stetem Steigen des Siedepunktes fortwährend Chlorwasserstoff, bis in beiden Fällen ein Gemisch von 20% ClH und 80% H^2O bleibt, das den constanten höheren Siedepunkt 110° hat. — Endlich kommt auch die Erscheinung vor, daß Flüssigkeitsgemische einen Siedepunkt haben, der noch unter dem Siedepunkte des flüchtigen Gemengtheiles liegt; dies ist der Fall, wenn die Gemengtheile nicht mischbar sind, weil alsdann (nach 413.) die Spannung des Dampfes gleich der Summe der Spannungen der beiden Dämpfe bei derselben Temp. ist, und weil demnach die dem Luftdrucke gleiche, das Sieden hervorrufende Spannung früher erreicht ist. So siedet ein Gemisch von Wasser und Schwefelkohlenstoff bei 43°, während Schwefelkohlenstoff für sich allein den Siedepunkt 46,6° besitzt. Darauf beruht bei-

;ender interessante Versuch von Kundt (1870): Mischt man Wasser von 45° und Schwefel-
ohlenstoff von 45°, so kocht das Gemisch lebhaft auf und fängt beim Aufrühren mit einem
Glasstabe immer von Neuem zu kochen an.

Kopp fand, daß bei vielen homologen Reihen der Zusammensetzungsdifferenz CH^2 eine
Siedepunktsdifferenz von 19° unter 1^{at} Druck entspricht; so siedet in der Ameisensäurereihe
ie Ameisensäure CH^2O^2 bei 99°, die Essigsäure $C^2H^4O^2$ bei 128°, die Propionsäure $C^3H^6O^2$
ei 175°, die Buttersäure $C^4H^8O^2$ bei 156°, die Valeriansäure $C^5H^{10}O^2$ bei 175°, ebenso
iedet in der Alkoholreihe der Holzgeist CH^4O bei 59°, der Weingeist C^2H^6O bei 78°, der
Propylalkohol C^3H^8O bei 97°, der Butylalkohol $C^4H^{10}O$ bei 116°, der Amylalkohol $C^5H^{12}O$
ei 135°. Doch gibt es auch Reihen, die für dieselbe molekulare Differenz CH^2 eine größere
der geringere Siedepunktsdifferenz besitzen; so hat die Reihe der Grenzkohlenwasserstoffe
$_nH_{2n+2}$ die Siedepunktsdifferenz 30°, die Benzolreihe 24°, und die Bromäthylenreihe
ur 15°. Landolt fand jedoch (1868), daß die Differenzenconstanz für niedrigere Drucke
eträchtlich gestört wird. Auch bestätigt sich die Folgerung aus Kopps Gesetz, daß isomere
Verbindungen von analoger Constitution (metamere) gleiche Siedepunkte haben müßten,
ach Dittmar (1868) nicht. Endlich zeigte Schumann (1881), daß bei homologen und me-
ameren Estern die Abweichungen vom Gesetze unter allen Drucken erheblich seien; es ist also
ie Hoffnung aufzugeben, daß Kopps Gesetz einen Anfang zur Aufhellung des Zusammen-
angs zwischen den Siedepunkten und Dampfspannungen verschiedener Stoffe bilden könne;
ine neue Hoffnung gewähren die Zustandsgleichungen von van der Waals (398 u. 425.).

Die Dampfwärme (Black 1762, Watt 1765, Regnault 1847). Unter Dampf- 419
wärme verstehen wir diejenige Wärmemenge, welche nothwendig ist, um die Gewicht-
inheit eines flüssigen Körpers von bestimmter Temperatur in Dampf von derselben
Temperatur zu verwandeln. Hiermit ist ausgesprochen, daß die dem flüssigen Körper
ugeführte Dampfwärme durch die Verdampfung verzehrt, als Wärme verschwunden,
ür das Thermometer und das Gefühl nicht mehr vorhanden ist, weil sie (nach der
n 410. vorgetragenen Theorie der Verdampfung) theils für die innere Arbeit der
Trennung der Moleküle, theils für die äußere Arbeit der Ueberwindung eines
äußeren Druckes verbraucht wurde. Zur Zeit der Geltung des Wärmestoffes konnte
in Verschwinden von Wärme nicht zugegeben werden; man dachte sich daher den
Wärmestoff im Inneren der Luftarten festgehalten und nannte die Dampfwärme
emgemäß latente oder gebundene Wärme des Dampfes. Die Dampfwärme des
Wasserdampfes von 100° (1^{at} Spannung) beträgt 536,5°; d. h. um 1^{kg} Wasser
von 100° in 1^{kg} Dampf von 100° zu verwandeln, müssen 536,5° verbraucht
werden, d. i. eine Wärmemenge, mit der man 536^{kg} Wasser um 1° erwärmen
könnte. Dieser hohe Wärmeverbrauch, der einer Arbeit von 227476^{mk} gleichkommt,
gibt uns ein Bild von der Stärke der inneren Vorgänge bei einer solchen Ver-
wandlung. Indessen scheint von den bis jetzt untersuchten Flüssigkeiten nur das
Kohlendioxyd eine höhere Dampfwärme als das Wasser zu besitzen, alle übrigen
aber eine bedeutend geringere; so ist die des Alkohols von 80° nur = 213°,
ie des Aethers von 35° sogar nur = 90°. Der größere Theil der Dampfwärme
wird zu innerer Arbeit, zur Ueberwindung der Anziehung der Moleküle auf einem
roßen Wege verbraucht, der kleinere Theil zu äußerer Arbeit, zur Ueberwindung
es äußeren Druckes. Dieser Theil wird gemessen durch Apu, worin A das
kalorische Aequivalent der Arbeitseinheit = $^1/_{424}$°, p den äußeren Druck und
die Volumvergrößerung bedeutet. Diese *äußere Dampfwärme* beträgt z. B.
ür Wasserdampf von 100° nur 40,2°, während der Rest 496,3° die *innere*
Dampfwärme bildet, diejenige Wärmemenge, welche Dampf von 100° mehr
nthält als die gleiche Wassermenge von 100°. Die äußere Dampfwärme ist bei
üchtigeren Flüssigkeiten kleiner, beträgt z. B. für siedheißen Aetherdampf nur 8°,
ür Chloroformdampf nur 5°; sie wird bei wachsender Temperatur größer, weil
lsdann der äußere Druck größer wird; so ist sie z. B. für Wasserdampf von 0°
leich 31°, von 100° = 40,2°, von 200° = 47°. Auch die innere Dampfwärme
t für flüchtigere Flüssigkeiten kleiner, indeß ebenso wenig wie die äußere dem
Siedepunkte proportional. Für siedheißen Aetherdampf ist sie 82°, für den später

siedenden Chloroformdampf nur 56c; im Gegensatze zur äußeren wird die innere Dampfwärme bei steigender Temperatur kleiner, weil dann der Dampf dichter ist; so ist für Wasserdampf von 0° die innere Dampfwärme = 575c, bei 100° = 496c, bei 200° = 417c; und dieses Abnehmen der inneren Dampfwärme mit steigender Temperatur ist bedeutender als die entsprechende Zunahme der äußeren Dampfwärme, so daß im Ganzen die Dampfwärme bei steigender Temperatur abnimmt. So ist die Dampfwärme des Wasserdampfes von 0° = 606c, von 100° = 536c, von 150° = 500c, von 200° = 464c.

In den Dampftabellen, die in besonderer Vollkommenheit in Zeuners „Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie" aufgenommen sind, befinden sich auch Tabellen über die Volumina von 1kg Dampf bei verschiedenen Temperaturen. Dividirt man die Dampfwärme durch die entsprechenden Volumina, so erhält man die Dampfwärme der Volumeneinheit, des Cubikmeters Dampf. Dieselbe zeigt ein besonders starkes Wachsthum mit der Temperatur. So ist die Dampfwärme in 1cbm Wasserdampf von 0° = 2,9c, von 100° = 325c, von 150° = 1304c, von 200° = 3602c, in 1cbm Kohlendioxyd von —25° = 3178c, von 45° = 14537c. — Zu den interessantesten Ergebnissen der mechanischen Wärmetheorie gehört die Wahrheit, daß diese Dampfwärme der absoluten Temperatur und einer Temperaturfunction des Druckes proportional ist und gefunden werden kann, indem man das Product dieser zwei Größen mit A = $^1/_{424}$c, dem calorischen Aequivalent der Arbeitseinheit multiplicirt. Man kann demnach, falls man das Spannungsgesetz eines Dampfes kennt, die Dampfwärme der Volumeneinheit berechnen. Wären dann noch die Volumina von 1kg Dampf bei verschiedenen Spannungen bekannt, so könnte man auch die Dampfwärme der Gewichtseinheit finden. Für den Wasserdampf kennt man durch Versuche von Fairbairn und Tait (1860) die Volumina von 1kg Dampf bei verschiedenen Spannungen und kann demnach die Dampfwärme a priori berechnen; eine solche Rechnung ist in Aufg. 691 durchgeführt. Die hierbei sich ergebende Uebereinstimmung mit den genauesten Versuchsresultaten, mit denen Regnaults, ist eine neue, schöne Bestätigung der Grundsätze der mechanischen Wärmetheorie.

Despretz (1823) verglich die Dampfwärme verschiedener Stoffe bei gleicher Dampfspannung mit den Dichten dieser Dämpfe, und glaubte danach das Gesetz aussprechen zu dürfen, daß bei gleichem Drucke die Dampfwärme verschiedener Dämpfe im umgekehrten Verhältnisse zu der Dichtigkeit stehe. Regnaults ausgedehnte Versuche haben dieses Gesetz nicht bestätigt. Zeuner (1866) berechnete, daß bei 1at das Verhältniß der Dampfwärme zum Dampfvolumen für Wasser = 325, für Aether = 268, für Schwefelkohlenstoff = 253 sei; bei 10at ergab sich das Verhältniß für Wasser = 2535, für Chloroform 1917, für Quecksilber 2250. Ebenso wenig hat sich das seinerzeit hochangesehene Gesetz von Watt bestätigt, daß die Summe der latenten und der fühlbaren Wärmemenge des Wasserdampfes für alle Temp. constant sei. Watt addirte nämlich die Wärme, die zur Erwärmung des Wassers von 0° an bis zur Verdampfungstemp. nöthig ist, die sogenannte Flüssigkeitswärme, zu der eigentlichen Dampfwärme, und erhielt so bei den damals noch ungenauen Versuchsresultaten nahezu gleiche Werthe für die sogenannte Gesammtwärme des Dampfes bei verschiedenen Temp. und Spannungen. Die Gesammtwärme ist aber bei 0° = 605,5 + 0 = 606,5c, bei 100° = 536 + 100 = 636c, bei 200° = 464 + 200 = 664c, weicht also ziemlich stark von Watts Gesetz ab.

Zur Bestimmung der Dampfwärme haben alle Untersucher von Watt bis auf Brix (1842) und Regnault das Wassercalorimeter angewendet. Dasselbe besteht aus einem mit Wasser von bestimmter Temp. gefüllten Gefäße, durch welches ein metallenes Schlangenrohr, oft auch durch hohle Metallkugeln unterbrochen, hindurchgeht. Der Dampf streicht durch dieses Rohr und wird condensirt, indem er seine Dampfwärme an das Wasser abgibt; aus der Menge der unten abfließenden Condensationsflüssigkeit und der Temperaturerhöhung, welche das Calorimeterwasser erfahren hat, läßt sich die abgegebene Dampfwärme berechnen. Es wird also hier nicht eigentlich die beim Verdampfen in die Flüssigkeit eingetretene, sondern diejenige Wärmemenge gemessen, welche bei der Umkehrung des Verdampfens, bei der Condensation aus dem Dampfe heraustritt; unter Voraussetzung gleichen

Druckes und gleicher Temp. sind diese zwei Wärmemengen allerdings einander gleich. Nur der älteste, übrigens sehr ungenaue Versuch von Black maß die eintretende Wärmemenge durch Beobachtung der Zeit, die ein auf einem gleichmäßig erhitzten Ofen stehendes Gefäß voll Wasser zur Verdampfung bedurfte und im Vergleiche mit der Zeit, die zur Erwärmung bis auf 100° nöthig war.

Regnault hat aus seinen umfassenden Versuchen über die Dampfwärme empirische Formeln abgeleitet für die Gesammtwärme λ, aus denen durch Subtraction der Flüssigkeitswärme q, die er ebenfalls in Formeln ausdrückte, die Dampfwärme $r = \lambda - q$ gefunden werden konnte. Er fand für

Wasser $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\,t;\ r = 606{,}5 - 0{,}605\,t - 0{,}00002\,t^2 - 0{,}0000003\,t^3$
Aether $\lambda = 94 + 0{,}045\,t - 0{,}00055556\,t^2;\ r = 94 - 0{,}07901\,t - 0{,}0008514\,t^2$
Chloroform $\lambda = 67 + 0{,}1375\,t;\ r = 67 - 0{,}09485\,t - 0{,}0000507\,t^2$.

Die große Dampfwärme des Wassers hat Anwendung zu der Dampfheizung, zum Erhitzen der Trockenwalzen, z. B. in Papierfabriken u. s. w. Bei der Dampfheizung wird der in einem tiefstehenden Kessel gebildete Dampf in Röhren unter den Fußböden hingeleitet, wo er durch Wärmeabgabe sich condensirt und wegen der etwas schiefen Lage der Röhren wieder in den Kessel zurückkehrt.

420 **Die Verdunstungskälte.** Die Eismaschine (Harrison 1856). Auch wenn eine Flüssigkeit bei niedriger Temp. allmälig durch Verdunstung in Dampf verwandelt wird, verbraucht sie Wärme; die Dampfwärme ist bei niedriger Temp. sogar größer als bei hoher; so ist die des Wassers bei 0° = 606°, bei 10° = 596°, bei 20° = 592°, aber bei 100° nur 536°. Wenn demnach eine Flüssigkeit verdunstet, so wird derselben Wärme entzogen, sie wird abgekühlt, es entsteht Verdunstungskälte. Die Verdunstungskälte ist um so stärker, je rascher die Verdunstung geschieht, je größer also die Oberfläche der verdunstenden Flüssigkeit, je luftleerer der Dunstraum und je flüchtiger die Flüssigkeit ist.

Der Wärmeverlust bei der Verdunstung entsteht dadurch, daß mehrere Mol. der Flüssigkeit stoßend auf ein Oberflächenmol. einwirken, wodurch sie ihre leb. Kft. theilweise an dasselbe abgeben und dadurch Wärme verlieren. Das getroffene Mol. fliegt in den Luftraum hinaus und wird so ein Dampfmol. Trifft es auf Luftmol., so wird es von diesen zur Flüssigkeit zurückgeworfen und gibt hierdurch seine Wärme zurück. Hierdurch folgt einfach, warum die Verdunstungskälte mit der Leere des Dunstraumes wächst. Flüchtigere Flüssigkeiten verdunsten rascher, können daher trotz geringerer Dampfwärme größere Verdunstungskälte erzeugen; so spürt man starke Kälte, wenn man die Hände mit Aether befeuchtet, obwohl die Dampfwärme des Aethers bei 10° nur 94° beträgt. — Auf der Verdunstungskälte beruht theilweise die Abkühlung der Luft durch Regen, die Beständigkeit der Körpertemp. des Menschen, indem mit steigender Temp. die Ausdünstung durch die Haut zunimmt, das Gefühl der Kälte bei Benetzung der Haut, das Verfahren, Gefäße durch nasse, umgeschlagene Tücher kühl zu halten. Die Spanier halten in porösen Thongefäßen, Alcarazzas genannt, Flüssigkeiten kühl; in Indien bringt man in porösen Schalen unter heiterem, kühlem Morgenhimmel Wasser zum Gefrieren. Benetzt man die mit Baumwolle umwundene Kugel eines Thermom. mit Aether oder schwefliger Säure und schwingt sie schnell durch die Luft, so kann man sie zum Gefrieren bringen. Wollastons Kryophor (1813) besteht aus zwei luftleeren Glaskugeln, die durch eine Glasröhre verbunden sind und von denen eine etwas Wasser enthält; bringt man die andere in eine Kältemischung, so gefriert das Wasser in der ersten. Durch starke Compression mittels des Natterer'schen Apparates entstandenes flüssiges Kohlendioxyd verdampft mit ungeheurer Raschheit und entzieht dadurch dem übrigen CO_2 soviel Wärme, daß dasselbe zu Schnee erstarrt. — Unter der Luftpumpe kann man Wasser zum Erstarren bringen, indem man ein Schälchen mit Schwefelsäure neben dasselbe stellt, das die Wasserdünste absorbirt; bei Anwendung von Schwefelkohlenstoff erstarrt sogar Queckſ. Die höchste Kälte wurde von Faraday durch Mischung von Kohlendioxydschnee und Aether unter der Luftpumpenglocke erzeugt; Natterer brachte durch Anwendung von flüssigem Stickstoffoxydul und Schwefelkohlenstoff sogar eine Kälte von 140° hervor. In allen diesen Fällen werden sehr rasch verdunstende Stoffe angewendet, deren Dämpfe durch die Luftpumpe gleich wieder entfernt oder durch die Schwefelsäure aufgesaugt werden, wodurch ununterbrochenes Verdunsten und daher starke Verdunstungskälte stattfindet. An der Niedrigkeit von Natterers Angabe sind Zweifel entstanden, weil man damals ein zuverlässiges Therm. für niedrigste Kältegrade noch nicht kannte, indem selbst das Luftherm. wegen der Nähe des Condensationspunktes von N und O unzuverlässig wird. Wroblewski und Olszewski (1883) benutzten bei ihren Condensationen (425.) flüssiges Aethylen, ein Wasser-

Luftherm. und ein thermoelektrisches, und glauben, eine Temp. von — 140° garantiren zu können; bei der Anwendung flüssigen Sauerstoffs soll eine Kälte von 200° entstanden sein.

Dasselbe Princip hat eine sehr wichtige Anwendung in der Eismaschine gefunden. Harrison in Neu-Holland benutzte zuerst (1856) zur Constr. einer solchen die Verdunstungskälte des Aethers. Eine verbesserte Harrison'sche Eism. von Siebe in Berlin erregte auf der Londoner Ausstellung (1862) großes Aufsehen. Die Masch. besteht aus dem [illegible] oder Congelator, einer durch eine Dampfmasch. getriebenen Luftpumpe und einem Condensator. Der Congelator ist ein mit concentrirter Kochsalzlösung gefüllter Kessel, in welchem ein System kupferner am Ende mit einander verbundener Röhren liegt. In den Röhren wird der Aether zum Verdampfen gebracht, die Aetherdämpfe werden durch die Luftpumpe in den Condensator geführt, dort zu Flüssigkeit condensirt und wieder in den [illegible] zurückgeführt. Hier wird durch die beschleunigte Verdunstung die Salzlösung auf eine sehr niedrige Temp. (bis — 15°) gebracht, und durch Ausspritzen eines Strahles dieser kalten Lösung auf Kästen von Zinkblech, die mit Wasser gefüllt sind, wird dieses zum Gefrieren gezwungen. — Carré hat eine größere Anzahl von Eism. seit 1866 ausgeführt. In seiner Aethereismasch. enthält der Congelator eine größere Anzahl von Zellen, die mit [illegible] den Aether enthaltenden Gefäßen umgeben sind, und in welchen andere mit Wasser gefüllte Kolben eingesetzt werden, so daß hier das Eis sogleich im Congelator entsteht. In einer anderen Constr. hat Carré Ammoniak verwendet und sowohl intermittirende Apparate für den Hausgebrauch, als auch continuirliche zum Fabrikbetrieb erbaut. Bei einer dritten Constr. wird die Luft aus einem halb mit Schwefelsäure gefüllten Kessel fortgepumpt, wodurch das Wasser in einer mit dem Kesselraume verbundenen Flasche zum raschen Verdampfen und dadurch zum Gefrieren gebracht wird. Kirk (1863) benutzte die Ausdehnung der Luft zur Constr. einer Eismasch.; der Haupttheil derselben ist ein Cyl., in welchem die verdichtete Luft ihre Wärme an Kühlwasser am einen Ende des Cyl. abgibt, während die verdünnte Luft am anderen Ende einer Chlorcalciumlösung ihre Wärme entzieht. Carré's größte continuirliche Masch., welche 30 000 Frcs. Anschaffungskosten und nur wenig Unterhaltungskosten erfordert, liefert per Stunde 200kg Eis; ein intermittirender Apparat, der bei einer Operation 1kg Eis liefert, kostet 282 Frcs.; die Schwefelsäure-Apparate kosten 120—1200 Frcs. und liefern per Stunde bis 100kg Eis.

421 **Der Leidenfrost'sche Tropfen** (1765). Der sphäroidale Zustand (Boutigny 1840). In allzu heißen Gefäßen sieden Flüssigkeiten nicht, weil sich zwischen ihnen und der heißen Gefäßwand eine Dampfschicht bildet, welche die Wärme schlecht leidet, und welche die Flüssigkeit trägt; diese nimmt daher wie jede unabhängige Flüssigkeit Kugelform an, tanzt vom Dampfe abgestoßen, auf dem Gefäße umher, verdampft wegen der geringen Menge durch den Dampf zugeleiteter Wärme nur langsam und zerspringt endlich, wenn unscheinbar klein geworden, mit einem leisen Knalle. Leidenfrost beobachtete die Erscheinung zuerst an Wassertropfen auf glühendem Metallbleche, Boutigny untersuchte dieselbe nach vielen Richtungen und glaubte in derselben einen vierten Aggregatzustand, den sphäroidalen Zustand zu erkennen; diese Benennung ist für die Zusammenfassung aller hierher gehörigen Erscheinungen gebräuchlich geworden, obwohl Boutignys vierter Zustand keine Annahme gefunden hat. Kühlt sich das Gefäß unter eine gewisse Grenztemperatur ab, so geräth die Flüssigkeit in ein zischendes und herumsprühendes Sieden. Diese Grenztemperatur ist um so niedriger, je tiefer der Siedepunkt der Flüssigkeit liegt; sie beträgt nach Boutigny für Wasser 171°, für Alkohol 134°, für Aether 61°. Indessen ist auch der Stoff der heißen Unterlage von Einfluß; am leichtesten gelingen die Versuche mit glühenden Metallschalen oder auf oxydfreien geschmolzenen Metallmassen, schwieriger in Glas- oder Porzellangefäßen; Aether, Brom, Schwefelkohlenstoff bilden selbst auf heißem Wasser, Wasser auf Terpentinöl Leidenfrost'sche Tropfen, Wasser auch auf heißem Sande; dagegen auf weißglühender Kreide, Holzkohle, [illegible] Eisen ist kein Sphäroid zu Stande zu bringen (Berger 1863). Die Temperatur der Flüssigkeit des Tropfens liegt immer unter dem Siedepunkte, je nachdem das Stadium der Erscheinung mehr oder weniger von demselben entfernt; nach Hoffmann kann sie um so niedriger sein, je höher das Gefäß erhitzt ist. Nicht nur leicht verdampfende, sondern alle flüssigen Körper, ja sogar manche schmelzbaren oder dampfbildenden, feuchten festen Körper nehmen nach Berger den sphäroidalen Zustand

in dem Sinne an, daß sie durch ihre Dampfhülle von der glühenden Unterlage getrennt werden und mit großer Geschwindigkeit rotiren, selbst Wismuth, Blei und Zinn rotiren in Tropfenform auf glühend fließendem Eisen. Hierdurch mag es sich erklären, daß man ungestraft die Hand in glühend geschmolzenes, reines Metall tauchen kann; hierin liegt wohl die Erklärung gelungener Feuerproben.

Manche sahen den Grund des Leidenfrost'schen Tropfens in der abstoßenden Kraft der Wärme, Andere darin, daß die Hitze die Adhäsion verkleinere, und daß die hierdurch überwiegende Cohäsion die Benetzung verhindere und die Tropfenform erzeuge, wie sie mit Wasser auf fettem Glas und Queckſ. auf Holz entsteht. Daß zwischen dem Sphäroid und der Unterlage keine Berührung stattfindet, hat Poggendorff durch einen Versuch nachgewiesen; um eine Magnetnadel ging der Draht eines el. Stromes zu dem glühenden Gefäße, während der andere in die Flüssigkeit tauchte; sowie dieselbe sphäroidal wurde, hörte die Wirkung des el. Stromes auf die Nadel auf. Tyndall erzeugte auf dem Gipfel einer convexen Schale einen sphäroidalen Tintentropfen und konnte zwischen diesem und der Unterlage hindurch einen glühenden Draht sehen oder einen grellen Streifen des Lichtes einer el. Lampe, welche hinter dem Apparat aufgestellt war. Wenn durch diese Versuche festgestellt ist, daß der Tropfen die Schale nicht berührt, so bleibt nur noch zu zeigen, daß derselbe von Dampf getragen wird; dies scheint durch Versuche Buddes (1871) dargethan, nach welchen unter der Luftpumpenglocke schon bei 80—90° Leidenfrost'sche Wassertropfen entstehen, weil alsdann der Dampf nur den Tropfen, nicht aber auch den Luftdruck zu tragen hat.

Ueber den sphäroidalen Zustand gibt es eine große Zahl interessanter Versuche. An einer umgekehrten glühenden silbernen Schale laufen aus einem Schwamm gepreßte Wassertropfen wie glänzende feste Perlen herab. — Ruht der Tropfen auf einer ziemlich ebenen Fläche, so wird das Entweichen des Zwischendampfes gestört; er geht dann durch den Tropfen und entweicht häufig rythmisch an den Seiten, wodurch derselbe Rosettenform annimmt; die igelartige Sternform großer Tropfen ist nach Berger eine Interferenz von Wellen, die durch aufsteigende heißere und sinkende kühlere Wassertheilchen entstehen. — Da die Temp. des Tropfens immer unter dem Siedepunkte liegt, so hat condensirtes Schwefeldioxyd in dem glühenden Platintiegel eine Temp. unter —10°; träufelt man Wasser auf diesen Tropfen, so gefriert dasselbe, und kann man demnach aus dem glühenden Platintiegel Eisstücke herausholen. Ja sogar Queckſ. kann man nach Faraday zum Gefrieren in einem glühenden Platintiegel bringen, indem man in demselben ein Gemenge von Aether und Kohlendioxydschnee in den sphäroidalen Zustand bringt und dann in den Tropfen einen zweiten kleineren Tiegel voll Queckſ. eintaucht; aus der Flamme der Aetherdämpfe kann man bald festes Queckſ. heben. — Ein Stückchen Kohlendioxydschnee kann man auf die Zunge nehmen, ohne von der furchtbaren Kälte von 80° einen Nachtheil zu spüren, weil der Schnee in sphäroidalen Zustand gelangend die Zunge nicht berührt, während man sich durch Zerdrücken dieses Schnees stark die Finger verbrennt. — Wenn hier von Tropfen die Rede ist, so darf man sich nicht Kügelchen von der Größe eines Regentropfens vorstellen, sondern auch bedeutend größere Massen; Berger gelang es, ein Pfund Wasser in eine Leidenfrost'sche Kugel zu verwandeln. Die Temp. des Tropfens ist zwar unter dem Siedepunkte, aber nicht weit von demselben entfernt; nach Boutigny liegt sie für Wasser zwischen 70 und 100°, für Alkohol zwischen 69 und 78°. — In dem sphäroidalen Zustande wird von Manchen eine Ursache von **Kesselexplosionen** vermuthet. Steht nämlich die Dampfmasch. still, so wird kein Wasser mehr in den Kessel gepumpt, aber das Entstehen und Ausströmen von Dampf findet noch statt; hierdurch werden die Kesselwände wasserfrei und bei fortdauernder Feuerung glühend. Beginnt nun mit dem Wiederarbeiten der Masch. die neue Wasserzufuhr, so ist dieses Wasser anfänglich in sphäroidalem Zustande, geräth aber bei allmäliger Abkühlung der Wände massenhaft ins Sieden. Man kann wirklich mit einem kleinen, glühenden, Wasser enthaltenden zugekorkten Kupfergefäß eine solche Explosion nachahmen. Indessen bestreitet Scheffler (1867) diese Erklärung, weil das eingepumpte Wasser in einer für den sphäroidalen Zustand zu heftigen Bewegung sei.

Die Dampfmaschine (Papin 1690, Watt 1765). 422

Wollte man an dem Ruhme, die weltumgestaltende Dampfmaschine erfunden zu haben, auch diejenigen Theil nehmen lassen, welche zuerst durch Dampf Körper in Bewegung setzten, so hätten schon Archimedes (geb. 278 v. Chr.) und Heron (geb. 120 v. Chr.) das Recht genannt zu werden; denn der erstere hat nach Leonardo da Vinci eine Dampfkanone, der letztere Drehkugeln und Drehmännchen erfunden, die durch ausströmenden Dampf nach dem Princip des Segner'schen Wasserrades, also durch Dampfreaction bewegt wurden. Sieht man aber das wesentliche Element der Dampfm. in dem **hohlen Dampfcyl.**, in welchem der Dampf einen Kolben fortschiebt, so gebührt Denis Papin (1647 bis 1710) die Ehre des Erfinders. Die Idee seiner Masch. ist aus Fig. 266 zu erkennen. Das Wasser

in dem Gefäße wird durch eine um dasselbe spielende Flamme in Dampf verwandelt, dieser hebt durch seine Spannung den Kolben p und wird dann durch Eintauchen des Gefäßes in kaltes Wasser condensirt; auf diese Weise wird unter dem Kolben ein leerer Raum erzeugt, so daß der äußere Luftdruck den Kolben zurückschieben muß. Dieser Gedanke war in der atmosphärischen Masch. von Newcomen (1705) verwirklicht, die bis in unser Jahrhundert in zahlreichen Exemplaren zum Wasserheben benutzt wurde. Der Kolben hing durch Ketten an dem einen Ende eines horizontalen Wageballens (Balancier), der an seinem anderen Ende die schweren Pumpengestänge trug; diese Gestänge zogen durch ihr Gewicht den Kolben aufwärts und der Raum hinter demselben füllte sich mit Dampf. Nach Condensation desselben durch auf den Cyl. fließendes Wasser wurde der Kolben durch den Luftdruck hinabgeschoben und so das Gestänge gehoben; es war also hier der Luftdruck die eigentlich wirksame Kraft, und der Dampf diente nur zur Erzeugung des leeren Raumes. Eine durch Zufall aufgefundene Verbesserung erhielt die Masch. 1712 dadurch, daß die Condensation durch eingespritztes Wasser geschah, das durch Oeffnen eines Hahnes in den Cyl. zugelassen wurde. Zur Bedienung dieses und des Dampfhahnes, der die Verbindung des Cyl. mit dem Dampfkessel her- und abstellte, war ein Knabe Humphrey Potter, angestellt, der sein Amt 1713 durch Schnüre dem Balancier übertrug und so die selbstthätige Steuerung erfand. Indessen wurde erst durch James Watt (1736—1819) die Dampfm. zu ihrer welthistorischen Bedeutung erhoben; 1765 verlegte er die Condensation in ein vom Cyl. getrenntes Gefäß, den Condensator, aus welchem die gelöste Luft und das überschüssige Wasser durch eine am Balancier hängende Luftpumpe fortgeschafft wurde. 1769 verbesserte er den Kolben und umgab den Cyl. mit einem den Wärmeverlust hemmenden Mantel; 1774 ließ er den Dampf zu beiden Seiten des Kolbens eintreten, statt der kalten Luft, benutzte so zuerst die Dampfspannung als bewegende Kraft und bahnte den Weg für die Hochdruckmasch., die durch Dampf von hoher Spannung bewegt wird und deren Grundgedanke schon 1725 von dem deutschen Mechaniker Leupold veröffentlicht worden war. 1782—83 erfand Watt das Parallelogramm zur Geradführung der Kolbenstange, die Verwandlung der hin- und hergehenden Bewegung des Balanciers in die drehende Bewegung einer Welle mittels Schubstange und Kurbel, die Beseitigung der Ungleichmäßigkeit dieser Drehung durch das Schwungrad und das Centrifugalpendel zur Regulirung des Dampfzuflusses; so war die Watt'sche Niederdruckmasch. vollendet. Viel einfacher ist die Hochdruckmasch., welche 1795 von Olivier Evans in Nordamerika eingeführt wurde, der auch die schon 1794 von Hornblower angewandte Expansion in die Hochdruckmasch. aufnahm. Fulton in Amerika benutzte 1807 die Dampfm. zum regelmäßigen Betrieb einer Dampfschifffahrt zwischen New-York und Albany, und Robert Stephenson baute 1829 die erste Locomotive zu der ersten Dampf-Eisenbahnfahrt von Liverpool nach Manchester am 6. October 1829.

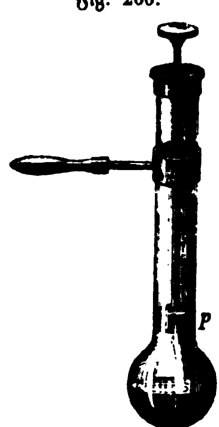


Fig. 266.

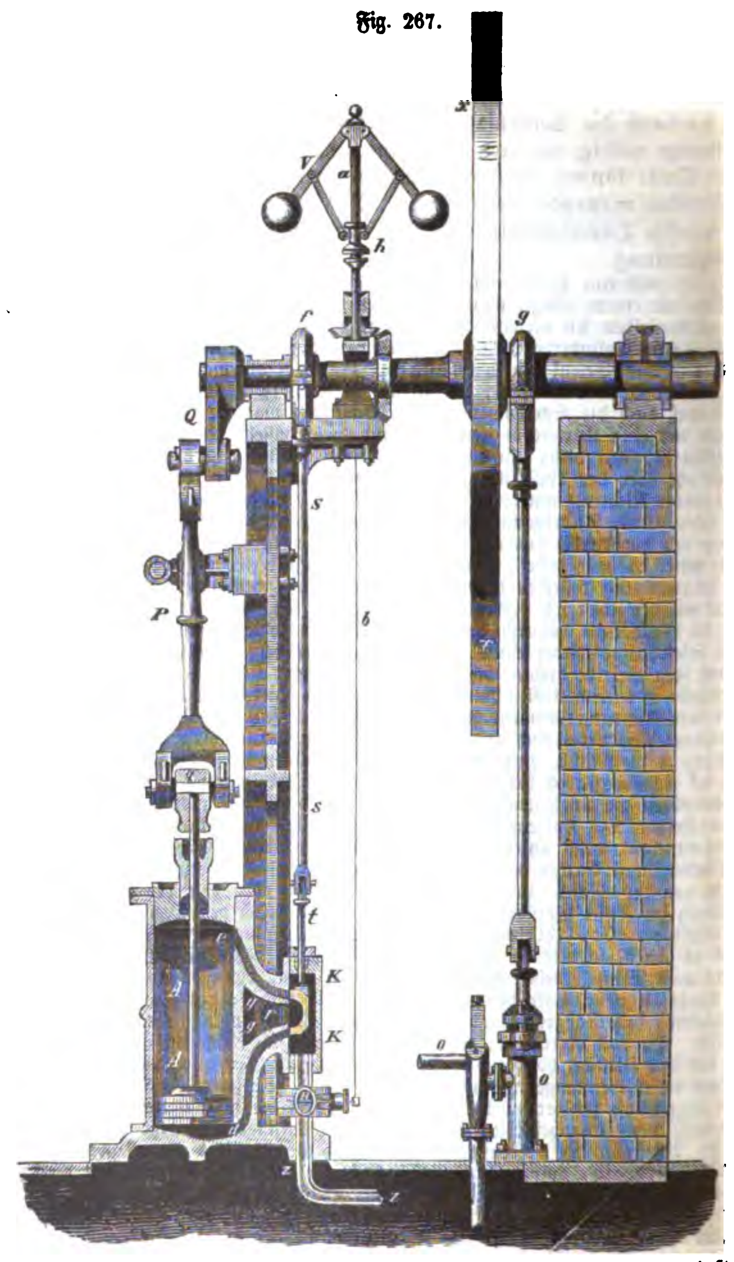
423 Die Hochdruckmaschine. Das wesentlichste Element der gewöhnlichen Dampfmaschine ist der Cylinder, ein hohles, oben und unten geschlossenes, cylindrisches Gefäß, in welchem eine dicke, kreisförmige Scheibe, der Kolben, genau an die Innenfläche sich anschließt. Der Dampf tritt abwechselnd zu beiden Seiten des Kolbens in den Cylinder ein und bewegt durch seine Spannung den Kolben abwechselnd vom Boden bis zum Deckel und wieder vom Deckel bis zum Boden. Diese hin- und hergehende Bewegung des Kolbens wird gewöhnlich in die drehende Bewegung einer Welle verwandelt, weil eine solche drehende Bewegung sich leicht durch Rollen, Räder, Hebel auf andere Maschinen übertragen läßt. Geht die Spannung des Dampfes über zwei Atmosphären hinaus, so wird die Dampfmaschine eine Hochdruckmaschine genannt; erreicht die Dampfspannung höchstens zwei Atmosphären, so ist die Maschine eine Niederdruckmaschine. Wegen der geringen Spannung in der letzteren Maschine kann dieselbe nur dann eine nennenswerthe Arbeit leisten, wenn der Kolben und der Cylinder einen großen Durchmesser haben, und wenn der Dampf auf der einen Seite des Kolbens condensirt wird, so daß die Spannung auf der anderen Seite einer fast vollständigen Luftleere sich gegenüber befindet und

demnach nahezu mit ihrem vollen Betrage wirken kann. Demnach ist ein unumgänglicher Bestandtheil einer Niederdruckmaschine der Condensator, ein Gefäß, in welches der Dampf von der nicht wirksamen Seite des Cylinders her einströmt, um dort durch einspritzendes kaltes Wasser condensirt, in Wasser verwandelt zu werden und dadurch seine Spannung sofort auf Null herabzubringen. Für das Herbeischaffen des kalten Wassers ist eine Kaltwasserpumpe und für das Fortschaffen des durch die Condensation erwärmten Wassers und der Condensatorluft eine Luftpumpe nöthig, zu deren Bewegung gewöhnlich der Balancier benutzt wird. Alle diese Theile können bei Hochdruckmaschinen wegfallen, obschon auch bei diesen die Condensation verwendet werden kann. Die Hochdruckmaschine ohne Condensation ist die einfachste Dampfmaschine und daher am geeignetsten für das Verständniß der Dampfwirkung.

Fig. 268 stellt eine Hochdruckm. von vorn gesehen (in der Vorderansicht), Fig. 267 eine Seitenansicht mit einem Längenschnitte durch den Cyl. A vor, so daß man den Kolben C und die mit demselben fest verbundene Kolbenstange, die luftdicht durch die sogenannte Stopfbüchse im Cylinderdeckel geht, wahrnehmen kann. Die Kolbenstange greift an ihrem oberen Ende in das Gelenk der Schubstange P, welche abermals durch ein Zapfengelenk mit der Kurbel Q verbunden ist, die fest auf der Welle R sitzt. Geht die Kolbenstange hinauf, so muß auch die Schubstange dieselbe Bewegung machen; das obere Ende derselben drückt daher das eine Kurbelende nach oben und dreht dasselbe, da das andere Ende an der Welle befestigt ist, mit dieser um die Achse derselben bis in seine höchste Stellung, wo die Kurbel senkrecht über der Welle steht. In diesem Moment steht die Schubstange vor der Kurbel in gleicher Richtung mit derselben; obwohl gleichzeitig der Kolben seine höchste Stellung hat und daher seinen Niedergang beginnt, so kann die hierdurch mittels Kolbenstange und Schubstange auf die Kurbel ausgeübte Zugkraft doch die Kurbel nur gegen die Welle pressen, aber nicht weiter drehen; diese Stellung der Masch. heißt der erste todte Punkt derselben. Für die Ueberwindung desselben ist das Schwungrad X bestimmt, das fest auf der Welle sitzend und mit derselben sich drehend eine gewisse leb. Kft. in sich aufnimmt und vermöge derselben die Welle und dadurch die Kurbel über den todten Punkt hinaus dreht. Nun macht die Schubstange wieder einen Winkel mit der Kurbel, kann also bei ihrem Niedergange durch Zug dieselbe drehen, bis der Kolben in seiner tiefsten Stellung und damit das freie Kurbelende in seinem tiefsten Punkte angelangt ist. Hier liegen Schubstange und Kurbel wieder in einer Richtung; obwohl gleichzeitig der Kolben seinen Aufgang beginnt, so könnte die Schubstange die Kurbel doch nur gegen die Welle pressen, nicht aber drehen, wenn nicht das Schwungrad die Masch. auch über diesen zweiten todten Punkt hinauszöge. Außer dieser Wirkung des Schwungrades hat dasselbe auch noch die Bestimmung, durch sein großes Beharrungsvermögen die Ungleichmäßigkeiten im Gange der Masch. auszugleichen, die durch die verschiedene Geschw. des Kolbens und durch die ungleiche Einwirkung der Schubstange auf die Kurbel entstehen, welch letztere in der verschiedenen Größe des Winkels der Schubstange mit der Kurbel ihren Grund hat. Größere Unregelmäßigkeiten, welche aus der wechselnden Größe der von der Masch. zu überwindenden Arbeiten oder von der Verschiedenheit der Dampfbildung im Kessel herrühren, werden gewöhnlich durch den Centrifugalregulator V mittels der Drosselklappe H in dem Dampfzuflußrohre z ausgeglichen. Geht die Masch. zu schnell, so hebt die Schwungkraft der Kugeln das Gleitstück h und hiermit den einen Arm eines Winkelhebels, dessen anderer Arm dann die quer durch das Zuflußrohr gehende Klappe H mehr senkrecht zu demselben stellt und so den Dampfzufluß mindert. Bei Verzögerung des Ganges bringt das Gewicht der Schwungkugeln die umgekehrte Wirkung hervor. Da das obere Ende der Schubstange nicht blos eine auf- und niedergehende, sondern auch eine seitliche, horizontale Bewegung hat, so müßte auch das untere Ende und hiermit auch die Kolbenstange eine horizontal hin- und hergehende Bewegung haben, wodurch die Stopfbüchse zerstört würde, wenn nicht durch die sogenannte Geradführung die horizontale Bewegung beseitigt wäre. Die Geradführungen sind sehr mannigfaltig; in unserer Fig. 268 trägt die Kolbenstange ein Querhaupt qq, das durch zwei Rollen sich zwischen den Leitstangen *l* immer in derselben Richtung erhält und dadurch auch der Kolbenstange ihre verticale Richtung sichert. Demselben Zwecke dient bei der Niederdruckm. das Watt'sche Parallelogramm. — Es ist nun noch das wichtigste und interessanteste Nebenelement der Dampfm., die selbstthätige Steuerung, der richtige Zu- und Abfluß des Dampfes zu betrachten. Demselben dienen (Fig. 267) die Dampfwege d, c, g und r, die Dampfkammer K und der in derselben sichtbare muschelförmige Schieber, der mittels der Stangen s und t durch das Excentrik f bewegt wird. Dasselbe ist eine massive Scheibe, die so auf der Hauptwelle sitzt, daß ihr Mittelpunkt nicht in die Achse der Welle fällt, son-

dern von demselben um die halbe Hubhöhe des Schiebers entfernt ist (s. Fig. 271—273). Um diese Scheibe ist lose ein Ring gelegt, mit dem die Steuerstange s, die an die Schieber-

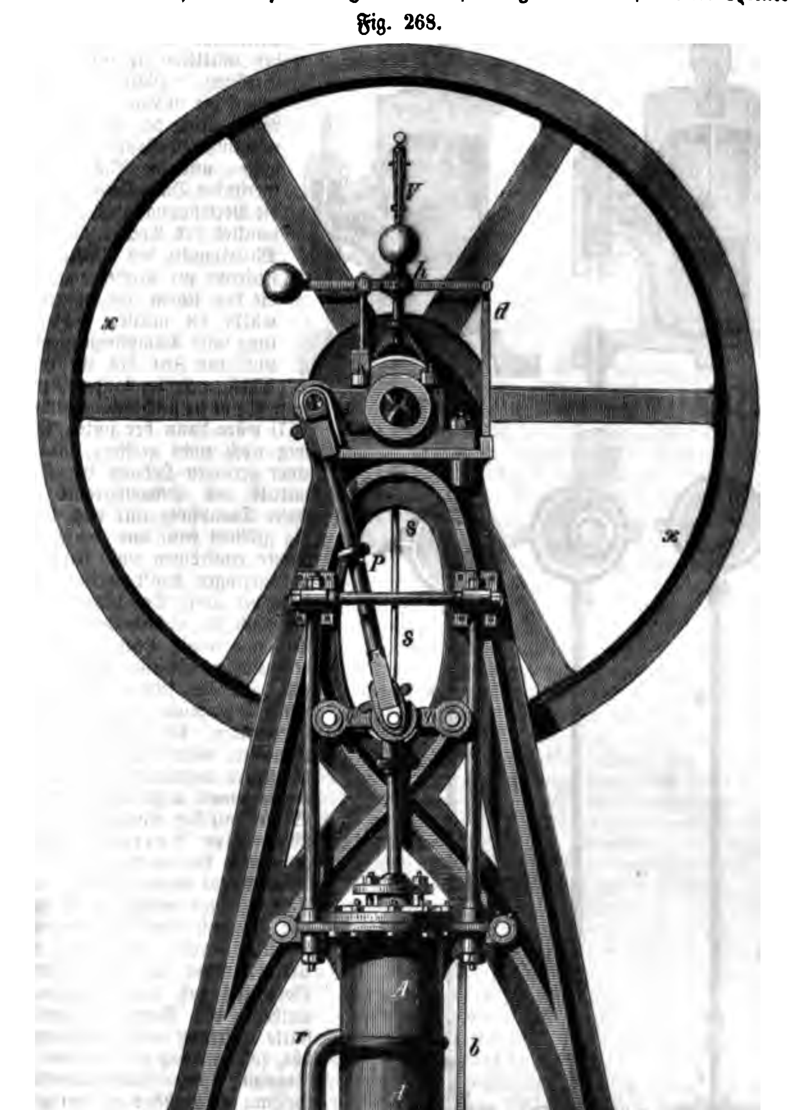
Fig. 267.



stange t gelenkt ist, ein Ganzes bildet. Ist der Mittelpunkt des Excentriks senkrecht über der Wellenachse, so hat der Schieber (Fig. 271) seine höchste Stellung, der untere Dampfweg d ist offen, der Dampf strömt aus der Dampfkammer unter den Kolben, während der

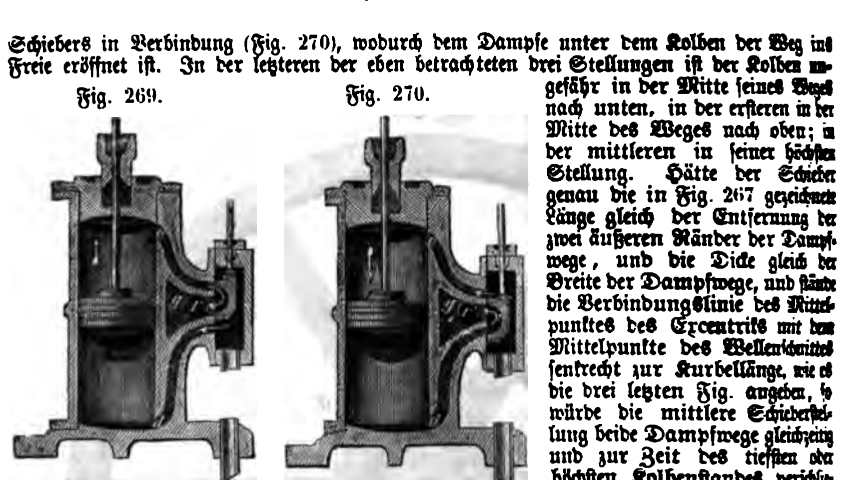
:re Dampfweg e (Fig. 269) mit dem Hohlraume des Schiebers communicirt, so daß der ampf über dem Kolben in diesen Hohlraum, aus diesem in den Hohlraum g der Cylinder-.nd und dann durch das Rohr r ins Freie entweicht. Liegt der Mittelpunkt des Excentrits

Fig. 268.



lich von der Wellenachse, so hat der Schieber seine mittlere Stellung (Fig. 272), die bei-ı Dampfwege d und e sind geschlossen. Hat der Mittelpunkt des Excentriks seine tiefste ;e senkrecht unter der Wellenachse (Fig. 273), so ist auch der Schieber in seiner tiefsten ellung, der obere Dampfweg e ist offen, der Dampf strömt über den Kolben, der untere mpfweg d dagegen steht nicht mit der Dampfkammer, sondern mit dem Hohlraume des

Schiebers in Verbindung (Fig. 270), wodurch dem Dampfe unter dem Kolben der Weg ins Freie eröffnet ist. In der letzteren der eben betrachteten drei Stellungen ist der Kolben ungefähr in der Mitte seines Weges nach unten, in der ersteren in der Mitte des Weges nach oben; in der mittleren in seiner höchsten Stellung. Hätte der Schieber genau die in Fig. 267 gezeichnete Länge gleich der Entfernung der zwei äußeren Ränder der Dampfwege, und die Dicke gleich der Breite der Dampfwege, und stände die Verbindungslinie des Mittelpunktes des Excentriks mit dem Mittelpunkte des Wellenschnittes senkrecht zur Kurbellänge, wie es die drei letzten Fig. angeben, so würde die mittlere Schieberstellung beide Dampfwege gleichzeitig und zur Zeit des tiefsten oder höchsten Kolbenstandes verschließen. Beim tiefsten Kolbenstande (Fig. 267) wäre dann der untere Dampfweg noch nicht geöffnet, und nach einer geringen Hebung des Kolbens mittels des Schwungrades würde dieser Dampfweg nur noch sehr wenig geöffnet sein, nur wenig Dampf könnte einströmen und könnte nur mit geringer Kraft wirken; ebenso wäre der obere Dampfweg nur wenig nach der Schieberhöhlung geöffnet, nur wenig Dampf würde über dem Kolben abfließen, und der Kolben hätte bei seinem Hube fast die ganze Spannung des Dampfes zu überwinden. Um diese Nachtheile zu beseitigen, wird das Voreilen des Schiebers angewendet; das Excentrik macht etwas mehr als einen rechten Winkel mit der Kurbel; der Ueberschuß wird Voreilungswinkel genannt. Hierdurch ist der untere Dampfkanal schon geöffnet, ehe der Kolben seinen tiefsten Punkt erreicht hat, so daß schon vor dem tiefsten Stande Dampf unter den Kolben strömt. Dies hat nicht blos den Vortheil, daß beim Steigen des Kolbens der Dampf sogleich eine starke Wirkung auf denselben ausübt, sondern daß auch in dem letzten Stadium des Niederganges die Geschw. des Kolbens ein wenig durch den Gegendampf, wie durch ein elastisches Kissen gemäßigt wird, wodurch der Gang der Dampfm. ein so ruhiger, geschmeidiger ist und einen sehr vortheilhaften Gegensatz bildet zu dem gewaltsamen Hin- und Herwerfen des Kolbens in manchen Gasmotoren. Das Voreilen für die Einströmung beträgt etwa $^1/_{100}$ des Schieberweges; damit das Voreilen für die Ausströmung noch etwas größer sei, macht man den Hohlraum des Schiebers etwas länger als die Entf.


Fig. 269. Fig. 270.

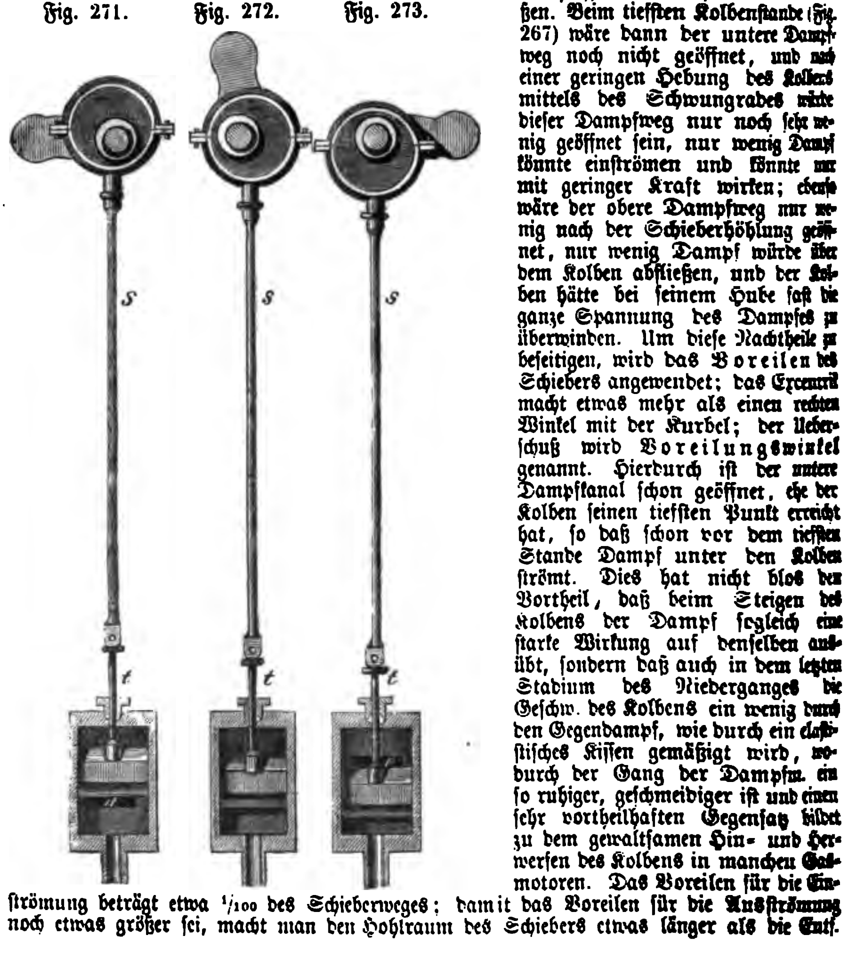


Fig. 271. Fig. 272. Fig. 273.

er inneren Ränder der Dampfwege; hierdurch, sowie durch das Voreilen wird der obere ampfweg auch schon vor dem tiefsten Kolbenstande geschlossen. Dies hat aber einen gron Vortheil; besonders wenn es schon in $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges geschieht, weil dann it einer 4, 3, 2 mal kleineren Dampfmenge eine nicht viel kleinere Arbeit erzielt wird.

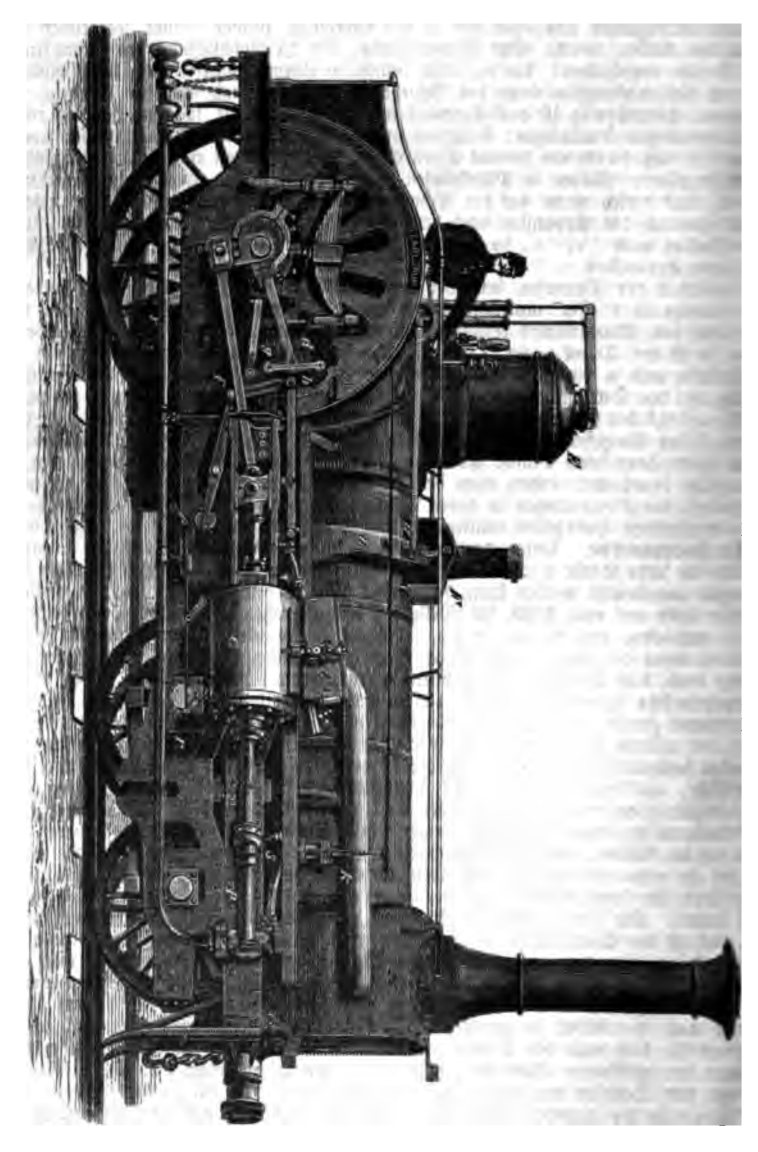
Maschinen, welche diese vortheilhafte Einrichtung haben, daß der Dampfzufluß schon ach einem Theile des Kolbenweges abgesperrt wird, heißen **Expansionsmaschinen**, eil in ihnen der Dampf hinter dem Kolben sich vermöge seiner Ausdehnsamkeit oder Expansibilität fortwährend ausdehnt und so mit allerdings immer kleiner werdender Spannung auf den Kolben wirkt. Der Mechanismus, der die Abschließung des Dampfzuflusses ewirkt, ist sehr verschieden; der einfachste besteht in einem größeren Voreilungswinkel verunden mit Ueberdeckungsrändern des Schiebers nach außen und nach der Höhlung zu; in ner anderen Einrichtung ist das Excentrik unrund und bewegt so den Schieber ruckweise n die nothwendigen Stellungen; Saulnier brachte über der ersten Dampfkammer noch eine weite an und ließ durch ein zweites Excentrik in derselben einen eigenen Expansionsschieber in- und hergehen; Mayer in Mühlhausen brachte zwischen den zwei Dampfkammern ein Ventil an, das durch einen auf der Schwungradwelle sitzenden unrunden Kegel geschlossen vird und demnach die Expansion nach dem Bedürfniß der Masch. regelt. Masch., in welhen der Dampf nach $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges abgeschlossen wird, heißen Masch. mit , 3, 2facher Expansion.

Den Effect der Dampfm. berechnet man, indem man den Druck auf den Kolben mit em Kolbenwege in 1 Sec multiplicirt und mit 75 dividirt. Der Druck auf den Kolben vird mittels des Manometers berechnet; ist die Spannung = p^{at} und die Kolbenfläche = q^{qcm}, so ist der Druck = $pq \cdot 1{,}028^{kg}$. Der Kolbenweg in 1 Sec ist = $nh/60$, wenn die Hubhöhe und n die Zahl der Kolbenspiele in 1 Min. bedeutet. Die Hindernisse und ie Bewegung der Dampfmaschinentheile verzehren einen Theil des Effectes, so daß der Nutzeffect nur 0,5 bis 0,7 des theoretischen Effectes beträgt. Viel geringer noch, nur wenige Procente, ist der Nutzeffect im Verhältnisse zu der in der erzeugten Wärme enthaltenen Areit; die besten Cornischen Masch. geben nur 14%. — Den Effect der Expansionsm. kann nan ungefähr berechnen, indem man den Kolbenhub während der Expansion in mehrere Theile zerlegt, die Spannungen in diesen Theilen nach dem Mariotte'schen Gesetze berechnet, nit den betreffenden Hubtheilen multiplicirt und die Producte addirt. (S. Aufg. 694).

424 **Die Locomotive.** Unter den unzähligen Anwendungen der Dampfm. nimmt die Locomotive die erste Stelle ein. Da bei dieser ebenso wenig wie bei der Schiffsm. ein großes Schwungrad angebracht werden kann, so wendet man in beiden Fällen zwei Dampfm. an, velche aber beide auf eine Welle, die Welle der beiden großen Triebräder (Schaufelräder) in er Weise einwirken, daß die eine Masch. in ihrem Kraftpunkte, in der günstigsten Stellung ich befindet, wenn die andere ihren todten Punkt durchläuft, was ganz einfach dadurch bewerkstelligt wird, daß die zwei Kurbelrichtungen senkrecht auf einander stehen. Fig. 274 stellt ine Crampton'sche Locomotive dar: C ist ein Cyl., die Kolbenstange bewegt sich links durch in Querhaupt gerade zwischen zwei Gleitschienen und setzt rechts die Speisepumpe p in Wirkung, die mittels des Rohres rr Wasser aus dem Tender saugt. Die Kolbenstange wirkt n der oben beschriebenen Weise mittels der in der Fig. sichtbaren Schubstange und Kurbel uf die Welle, auf der die zwei großen Triebräder fest sitzen, und auf welcher mittels besonders sorgfältig construirter Lagerbüchsen und mittels starker Federn der dicke eiserne, vierckige Rahmen ruht; dieser trägt alle übrigen Maschinentheile und überträgt so deren großes Gewicht auf die Räder, welche hierdurch eine so große Reibung gegen die Schienen auslben, daß sie nicht schleifend auf denselben sich umdrehen, sondern wie Zahnräder in dieelben greifend sich fortbewegen; Berglocomotiven müssen zu dem Ende ein noch größeres Gewicht haben. Die Steuerung geschieht durch die gewöhnliche Schiebereinrichtung mit Excentrik; doch ist die Einrichtung zur **Umsteuerung** ausgebildet, so daß nach einem Stillstande der Locomotive die entgegengesetzte Richtung eingeschlagen werden kann, was einfach dadurch bewerkstelligt wird, daß man den Kolben die entgegengesetzte Bewegung von derenigen machen läßt, die er im Augenblicke vor dem Stillstande besaß; dann drehen sich auch ie Kurbel und die Räder in umgekehrter Richtung. Die Kolbenbewegung wird aber dadurch gewechselt, daß man den Dampf auf der anderen Seite des Kolbens einströmen läßt, ndem man den geöffneten Dampfweg schließt und den geschlossenen Dampfweg öffnet, also ndem man den Schieber um seine ganze Weglänge verschiebt. Da das Excentrik sich nicht gleichzeitig mit in die entgegengesetzte Lage verschieben läßt, so sind zwei Excentriks direct eben einander auf der Welle so angebracht, daß ihre Excentricitäten um 180° gegen einander verschoben sind. Die beiden Stangen derselben sind an die beiden Enden der sogenannten **Hängtasche** oder **Coulisse** dfg gelenkt, welche vom Locomotivführer mittels ines Hebelwerkes gehoben und gesenkt werden kann. Sie besteht aus zwei oben und unten verbundenen Eisenschienen, deren innere Seiten sehr glatt geschliffen sind, und welche zwischen ich das feste Ende der Schieberstange als Gleitstück fassen. Ist dieses Gleitstück oben, so

wird es durch das obere Excentrik hin- und herbewegt; wird aber die Coulisse vom Locomotivführer gehoben, so gelangt das Gleitstück an das untere Ende der Coulisse, wird nun sammt der Schieberstange durch das untere Excentrik bewegt, sowie auch zeitig, da die beiden Endpunkte der Coulisse ungleich weit von der Welle entfernt sind, die Länge des Schieberweges verschoben.

Fig. 274.



Der **Dampfkessel**, welcher bei den stationären Dampfm. gewöhnlich die Form beiderseits kugelförmig geschlossenen Cyl. besitzt und in einem Heerde von feuerfestem Mauerwerke mit sehr hohem Kamine einer großen Hitze ausgesetzt wird, muß bei der Locom. ohne Mauerwerk, mit niedrigem Schornsteine und in kleinem Raume dennoch eine

tende Erhitzung zulassen. Diese Aufgabe ist durch den Röhrenkessel gelöst, der ein langes, cylindrisches, auf den Rahmen befestigtes, ringsum geschlossenes Gefäß ist, das von zahlreichen zur Cylinderachse parallelen Röhren durchzogen ist. Dieselben beginnen in der Hinterwand der Feuerbüchse, deren Wände doppelt sind und so Hohlräume bilden, die mit dem Kesselraume in unmittelbarem Zusammenhange stehen und daher mit Kesselwasser erfüllt sind; von dieser Hinterwand der Feuerbüchse ziehen die Rauchröhren durch den ganzen Cyl. bis in den am anderen Ende liegenden Kaminraum, sie werden von den heißen Verbrennungsgasen durchzogen, sind von dem Kesselwasser umspült und bieten so demselben eine sehr große Heizfläche zur ausreichenden Bildung des Dampfes. Der Dampf strömt in dem wasserfreien, oberen Kesseltheile nach dem Dome oder der Dampfhaube E und vertheilt sich von da durch die Kanäle a nach den beiden Cyl.; der aus diesen strömende Dampf geht durch zwei im Kaminraume sich vereinigende Röhren zu dem Ausblaserohr, das sich stark verengert und daher den Dampf nöthigt, als stark gespannter Strahl durch den Schornstein zu entweichen; dieser Dampfstrahl reißt vermöge der saugenden Wirkung der Luftstrahlen die Kaminluft mit sich fort und bildet einen luftverdünnten Raum, so daß die Flammenluft der Feuerbüchse in die Rauchröhren gesaugt und durch die Roststäbe neue Außenluft in die Feuerbüchse gepreßt wird; demnach wird durch den ausströmenden Dampf der Zug erhalten, der bei den stationären Masch. durch einen hohen Schornstein erwirkt werden muß; natürlich ist in Folge dessen der Rückdruck des abströmenden Dampfes größer als 1^{at}, woraus sich die Nothwendigkeit eines hochgespannten Dampfes in der Locomotive ergibt. Daß die Locomotivmasch. Hochdruckm. sein müssen, ist indessen auch schon durch die Unmöglichkeit bedingt, Condensatoren und große Cyl. anzuwenden und große Wassermassen mitzuschleppen; in Dampfschiffen, wo diese Unmöglichkeit nicht vorliegt, werden deßhalb Niederdruckm. mit Condensation verwendet. — An der Mündung des Dampfrohres in dem Dome ist entweder mittels eines Ventiles oder mittels einer durchlöcherten Scheibe, die von dem Locomotivführer durch einen Handgriff mehr oder weniger geschlossen werden können, für einen Regulator gesorgt, der sich in der Crampton'schen Locomotive bei u in dem Raume F befindet. Auf dem Dome sitzen Sicherheitsventile, deren Hebel nicht durch Gewichte, sondern durch Federwagen belastet sind, weil diese nicht so sehr wie jene durch die Fahrstöße erschüttert werden; dann befindet sich an demselben die Dampfpfeife (254.) und an der Vorderfläche der Feuerbüchse, leicht für den Führer sichtbar, Wasserstandszeiger und Manometer. Als selbstthätige Speisevorrichtung wandte man in letzter Zeit häufig Giffards Dampfstrahlpumpe an. — Die Crampton'sche Locomotive hat sehr große Triebräder und ein etwas unter der Masch. drehbares vierräderiges Vordergestell, wodurch sie einer größeren Geschw. selbst auf scharfen Bahnkrümmungen fähig ist.

4. Die Condensation (Faraday 1823, 1845). **Der kritische Punkt** (Andrews 1869 u. f., van der Waals 1873 u. f.) **425** Wie eine Flüssigkeit bei Erhöhung ihrer Temperatur verdampft und zwar bei Erniedrigung des Druckes rascher, so verwandeln sich Luftarten durch Erniedrigung der Temperatur und Erhöhung des Druckes in Flüssigkeit, sie werden condensirt. Jedoch gibt es für jede Luftart eine Temperatur, über welcher dieselbe selbst durch den höchsten Druck nicht condensirt wird, die kritische Temperatur; der Druck, bei welchem in der kritischen Temperatur Condensation stattfindet, heißt der kritische Druck. Ist die Temperatur einer Luftart unterhalb der kritischen, so muß der Druck zur Condensation um so größer sein, je höher die Temperatur ist, kann also auch bei der entsprechend niedrigen Temperatur sehr gering werden. In der Nähe des kritischen Punktes, beim Gange durch denselben findet der Uebergang aus dem luftförmigen in den flüssigen Zustand, so wie der umgekehrte Uebergang ohne jede äußerlich wahrnehmbare Veränderung statt, zwischen dem flüssigen und luftförmigen Zustande besteht vollkommene Continuität.

Bei manchen Luftarten, die man im gewöhnlichen Leben Dämpfe nennt, findet die Condensation unter dem Drucke der Atm. bei geringer Abkühlung statt; der Wasserdampf, den wir ausathmen und der im Sommer sowie im warmen Zimmer der Luft völlig gleicht, nämlich als farbloses, durchsichtiges Gas auftritt, nimmt in kalter Winterluft die Gestalt eines Hauchwölkchens an, weil er sich in kleinen Wassertheilchen condensirt, die durch Luft getrennt sind; auch Nebel und Wolken sind condensirter Wasserdampf, der durch die Abkühlung wasserdampfhaltiger Luft z. B. durch einen kalten Luftstrom entsteht. In anderen Fällen schlägt sich der Wasserdampf als eine Wasserschicht auf Glasscheiben oder Wänden nieder oder in Tröpfchen als Thau auf Pflanzen, und wenn er in größerer Menge durch ein in kühlem Wasser liegendes Schlangenrohr streicht, so fließt aus deren Mündung ein

Wasserstrahl (Destillation). Viele Luftarten condensiren sich selbst bei niedriger Temp. erst dann, wenn der Druck stark erhöht wird; so muß Kohlendioxyd (CO_2) bei 0° einem Drucke von 35at ausgesetzt werden, wobei es sich zu einer wasserklaren Flüssigkeit verdichtet. Als jedoch Natterer (1852) die Gase N, H, CO, Aethylen und Luft einem Drucke von 3600at aussetzte, blieben dieselben dennoch gasförmig und nahmen sogar einen viel größeren Raum ein, als Mariottes Gesetz entspricht; statt ein 3600 mal kleineres Vol. nahmen sie nur ein 1000 mal kleineres Vol. ein. Die Temp. Natterers lag eben über dem kritischen Punkt, den erst Andrews entdeckte; bald nach ihm fand v. d. Waals, daß die kritische Temp. der Luft bei — 158° liegt, daß also über dieser Temp. eine Condensation der Luft unmöglich ist.

Die Eigenschaften des kritischen Zustandes treten deutlich am Kohlendioxyd hervor, dessen kritische Temp. 31° und kritischer Druck 73at beträgt. Ueber 31° warme Kohlensäure wird auch durch den größten Druck nicht flüssig; bei 31° wird sie durch 73at condensirt, bei 13° durch 49at, bei 0° durch 35at; wenn sie flüssig geworden ist und nun noch abgekühlt wird, so bleibt sie auch unter geringerem Drucke flüssig; Kohlensäure von — 79° ist bei gewöhnlichem Luftdrucke flüssig; wenn sie jedoch wärmer wird, verdampft sie mit ungeheurer Raschheit und bildet dabei bekanntlich durch die Verdunstungskälte den Kohlendioxydschnee. Wenn ihre Temp. 0° beträgt, so verdampft sie bei jedem Drucke unterhalb 35at, und die Trennungsfläche zwischen Flüssigkeit und Dampf kann in dem Glasgefäße deutlich wahrgenommen werden; ebenso wenn sie unter einem Drucke von 49at eine Temp. über 13° erhält u. s. w. Ganz anders wird aber die Erscheinung, wenn der Druck höher ist wie der kritische von 73at; wird sie unter einem solchen höheren Drucke erwärmt, so geht die Flüssigkeit unvermerkt in Gas über; ebenso unmerklich geschieht der Uebergang, wenn sie durch Abkühlung wieder flüssig wird. Gleiches gilt auch für Temp. über der kritischen. Drückt man das Gas, dessen Temp. über 31° liegt, bis über den kritischen Druck hinaus zusammen, kühlt es dann ab und erniedrigt den Druck, so ist es unvermerkt flüssig geworden. Umgekehrt, wird die Flüssigkeit einem Drucke größer als der kritische ausgesetzt, dann über die kritische Temp. hinaus erwärmt, so erscheint sie nach der Druckverminderung als Gas, ohne daß der Uebergang äußerlich wahrgenommen werden konnte. Cagniard de la Tour war schon 1822 nahe an der Entdeckung dieser Erscheinungen, indem bei seinen Versuchen (416) die Flüssigkeiten bei den angegebenen hohen Temp. verschwunden waren; er hatte also schon die kritische Temp. gefunden für Wasser 400°, Alkohol 259°, Aether 200°, Schwefelkohlenstoff 275°. Andrews schlug vor, die Luftarten unter der kritischen Temp. Dämpfe zu nennen, weil sie durch Druck allein verflüssigt werden können, dagegen die Luftarten über der kritischen Temp. Gase, da zu ihrer Condensation Druck und Abkühlung nöthig ist. Wissenschaftlich wäre diese Benennung richtig, aber der Sprachgebrauch wird es sich wohl nicht nehmen lassen, die den gewöhnlichen Flüssigkeiten entströmenden Luftarten in hergebrachter Art Dämpfe zu heißen.

Nach der Entdeckung des kritischen Zustandes, der durch v. d. Waals seine mathematische Erklärung fand, ist das Mißlingen vieler Unternehmungen, alle Luftarten zu condensiren, begreiflich; sie konnten erst gelingen, wenn Temp. unterhalb der kritischen in Anwendung gebracht wurden. Zuerst gelang es natürlich schon vor manchen Jahrzehnten, die sogen. coërciblen Gase mit hoher kritischer Temp. zu condensiren, Ammoniak (van Marum), Schwefeldioxyd (Menge) u. A. Bei seinen ersten Arbeiten (1823) benutzte Faraday nicht blos Abkühlung sondern auch Compression und zwar selbstthätige der Gase. In ein umgekehrt U-förmiges starkes Glasrohr brachte er den gasentwickelnden Stoff, z. B. mit Ammoniak gesättigtes Chlorsilber, schmolz das andere Ende zu und entwickelte nun im ersten Ende das Gas, das sich durch seinen eigenen Druck und äußere Abkühlung im anderen Ende condensirte; so verflüssigte er Chlor, Ammoniak, Cyan, Schwefeldioxyd, Schwefelwasserstoff, Salzsäure und Kohlensäure; nicht gelang es mit O, N, H und anderen Gasen von tiefer kritischer Temp. Thilorier benutzte seit 1834 dasselbe Verfahren, jedoch in einem eisernen Gefäß, stellte hierdurch größere Mengen flüssiger Kohlensäure her und lernte ihre Eigenschaften kennen. Da sein App. häufig Unglücksfälle herbeiführte, so wandte man später und jetzt noch Natterers App. an, der aus einer dickwandigen, schmiedeeisernen Flasche besteht, welche unten ein Druckventil und oben eine durch eine Schraube verschließbare Oeffnung hat und auf 150at geprüft ist. Dieses Gefäß ist, von Eis oder Kältemischung umgeben, auf die obere Mündung einer starken Pumpe gesetzt, die durch Schwungrad, Kurbel und Kolbenstange bewegt wird und so das Gas in die Flasche preßt. Mit diesen App. lassen sich große Mengen flüssiger CO_2 herstellen; läßt man dieselbe in ein weites Blechgefäß strömen, so erhält man durch die Verdunstungskälte den Kohlendioxydschnee, der an freier Luft eine Temp. von — 70° hat und mit Aether gemengt unter der Luftpumpenglocke — 100° annimmt. Hiernach setzte Faraday (1845) seine Condensationsversuche fort, indem er das U-Gefäß in den 100° kalten Schnee brachte und mittels einer Druckpumpe Gas in dasselbe trieb; er fand zunächst die verschiedenen Drucke und Temp., bei denen CO_2 flüssig wird, condensirte N_2O (Stickoxydul) bei *31at und* — 1°, sowie bei 1at und — 87°, und Aethylen (Leuchtgas) bei 9at und — 73°, *bei 42at* und — 1°; seitdem hat man die kritische Temp. dieses Gases 1°, den kritischen Druck

43^{at} gefunden, was ganz den Angaben Faradays entspricht und es erklärlich macht, daß in neueren Versuchen das flüssige Aethylen mehrfach die Stelle von CO_2 vertritt. Nach Faraday blieben von den Gasen der unorganischen Natur nur 6 nicht coërcibel: H, O, N, CO, Sumpfgas oder Methan (CH_4) und Stickoxyd (NO); man nannte dieselben **permanente Gase**, glaubte also, sie würden nie verflüssigt werden, woran indeß Manche zweifelten. Allerdings hat sich herausgestellt, daß die kritische Temp. der meisten weit unter -100^0 liegt, während ihre kritischen Drucke etwas kleiner als der von CO_2 sind, mit Ausnahme von H, dessen kritischer Druck fast 100^{at} beträgt. Nach der Entdeckung des kritischen Punktes richtete man demnach die Arbeiten dahin, möglichst tiefe Temp. zu erzeugen. Cailletet (1877) brachte die Gase auf die tiefe Temp., indem er sie durch einen Druck von 300^{at} in oben geschlossene Capillargefäße mit weitem Fuße preßte und dann den Druck plötzlich aufhob, so daß die Gase arbeitleistend sich beträchtlich ausdehnten, wodurch nach der Theorie eine Abkühlung um 200^0 eintritt; die Capillaren erfüllten sich dann mit einem undurchsichtigen Nebel, wodurch eine allerdings unvollkommene Condensation und die Möglichkeit einer vollkommeneren angezeigt wurde. Raoul Pictet (1877) benutzte die Verdunstungskälte von flüssigem Schwefel- und Kohlendioxyd; das erstere brachte durch seine Verdunstung in dem letzteren eine Kälte von -70^0 hervor und das letztere dann durch seine Verdunstung eine Kälte von -140^0. In dem letzteren lag der röhrenförmige Recipient, in welchen der O unter einem Drucke von 500^{at} einströmte; derselbe wurde wohl condensirt, denn beim Oeffnen eines Hahnes schoß ein zusammenhängender Strahl heraus. Für den H wurde durch die Anwendung von flüssigem Stickoxydul die Kälte noch erhöht, der Druck soll 600^{at} betragen haben, und es schoß eine stahlblaue Flüssigkeit aus dem Hahn, untermischt wohl mit Wasserstoffkörnern, die ein Rasseln auf dem Boden bewirkten. Das Problem der Condensation der permanenten Gase ist hiermit nicht gelöst; dies ist erst dann der Fall, wenn man z. B. ein Gefäß voll flüssigen Sauerstoffs präsentiren kann oder Wasserstoffschnee darzustellen vermag. Auch sind die Angaben der Physiker über ihre Temp. wohl nicht zuverlässig, weil selbst Luftthermometer bei diesen niederen Temp. unzuverlässig werden. Wroblewski und Olszewski (1883) stellten sich daher zunächst die Aufgabe, noch niedrigere Temp. zu erreichen; sie benutzten dazu flüssiges Aethylen, das sie durch ein Bad von Kohlendioxydschnee und Aether abkühlten; das Aethylen siedet unter dem Luftdrucke bei -105^0, so daß durch das Auspumpen seiner Dämpfe wohl eine bedeutend niedrigere Temp. erreichbar scheint; sie fanden dieselbe mit einem Wasserstofftherm. $= -136^0$, wobei sie festen Alkohol erhalten konnten. Als nun aus der Cailletetschen Capillare der Sauerstoff unter 20^{at} Druck durch einen wagrechten Arm in einen vertical hinabsteigenden Röhrentheil strömte, der in dem flüssigen Aethylen von -136^0 sich befand, wurde er flüssig, wasserklar durchsichtig, zeigte einen deutlichen flachen Meniscus zwischen Flüssigkeit und Gas, schäumte bei Verminderung des Druckes und gerieth in der ganzen Masse ins Sieden, als der Druck noch mehr vermindert wurde. Die Verflüssigung von N und CO fanden die beiden Forscher bedeutend schwieriger als die von O; selbst bei einem Drucke von 150^{at} und -136^0 Kälte war keine Spur von Flüssigkeit zu bemerken; erst als man den Druck plötzlich beseitigte, erschien in der Stickstoffröhre ein Aufbrausen von Flüssigkeit, das auch bei CO, aber schwächer, bemerkt wurde. Noch vollkommener soll die Verflüssigung des O zuletzt Cailletet (1884) gelungen sein, indem derselbe durch flüssiges Aethylen das Sumpfgas oder Methan condensirte und durch dessen Verdunstungskälte den verdichteten O direkt in Flüssigkeit verwandelt haben soll. Von dem flüssigen Methan läßt sich allerdings eine große Verdunstungskälte erwarten, da seine kritische Temp. $= -76^0$ und sein kritischer Druck 47^{at} beträgt; jedoch dieser hohe kritische Zustand macht es einigermaßen zweifelhaft, daß das weit entfernte Aethylen (1^0 und 44^{at}) zur Condensation ausreiche. Wäre die Nachricht sicher, so würde wohl bald durch den flüssigen O auch flüssiger N erzeugt werden, durch diesen dann flüssiges CO und schließlich flüssiger H entstehen können.

Die **Theorie des kritischen Punktes** baute **van der Waals** (1873) auf seine **Zustandsgleichung** Fl. (45), $(p + a/v^2)(v - b) = R(1 + \alpha t)$. Die Const. R ergibt sich, wenn man $t = o$, v und $p = 1$ setzt; man erhält dann $R = (1 + a)(1 - b)$. Durch Einsetzung in die Zustandsgleichung erhält diese die Gestalt $pv = (1 + a)(1 - b)(1 + \alpha t) - a/v + bp + ab/v^2$. Entwickelt man dieselbe nach Potenzen von v, so erhält man $v^3 - v^2 [b + (1 + a)(1 - b)(1 + \alpha t)/p] + v \cdot a/p - ab/p = 0$. Eine solche cubische Gl. hat nun entweder 1 reelle und 2 imaginäre Wurzeln oder drei reelle Wurzeln, d. h. es entstehen für ein und dasselbe p und t drei verschiedene Werthe von v, d. h. der Körper kann bei derselben Temp. und demselben Drucke drei verschiedene Volumina annehmen, in drei verschiedenen Zuständen auftreten, d. h. im flüssigen, luftförmigen und *in einem dritten Zustande*, der noch nicht mit Sicherheit erkannt ist (der

feste ist ausgeschlossen). Wie sich das nun auch verhalten möge, soviel steht sicher, daß im kritischen Punkte das Gas und die Flüssigkeit dasselbe Volumen haben, indem sie unvermerkt ineinander übergehen. Van der Waals setzt nun voraus, daß im kritischen Punkte alle drei Zustände gleiches Volumen haben, daß also die Zustandsgleichung den kritischen Punkt ausdrückt, wenn die 3 Wurzeln der Gleichung einander gleich sind. Die drei Wurzeln der cubischen Gleichung $x^3 - mx^2 + nx - o = 0$ sind aber einander gleich, wenn $x = \frac{1}{3}m$, $x^2 = \frac{1}{3}n$ und $x^3 = o$; es muß also das kritische Volumen φ gleich dem dritten Theile des Klammerausdruckes, sein Quadrat φ^2 gleich dem dritten Theil des Coeff. a/p und sein Cubus gleich dem absoluten Gliede ab/p sein; für p, den kritischen Druck setzen wir entsprechend den Buchstaben π und für t, die kritische Temp. den griechischen Buchstaben ϑ. Wir erhalten dann für den kritischen Punkt die 3 Gleichungen $b + (1 + a)(1 - b)(1 + \alpha\vartheta)/\pi = 3\varphi$, sodann $a/\pi = 3\varphi^2$ und $ab/\pi = \varphi^3$, woraus sich ergibt das kritische Volumen $\varphi = 3b$, der kritische Druck $\pi = a/27b^2$ und für die kritische Temperatur $1 + a\vartheta = \frac{8}{27} a/b\,(1 + a)(1 - b)$ oder mit großer Annäherung $8a/27b$.

Aus den Größen a und b für die Abweichungen von den Gasgesetzen, die sich aus diesen bestimmen lassen, können also die kritischen Größen berechnet werden. So ist für Kohlensäure $a = 0{,}00874$ und $b = 0{,}0023$; hieraus ergibt sich die kritische Temp. des Kohlendioxyds $\vartheta = 32^\circ$, während Andrews 31° angibt. Sarrau hat (1882) nach der erweiterten Zustandsgleichung von Clausius (1880) mittels der Amagat'schen Versuche die kritischen Größen von H, O, N, Methan und Aethylen berechnet, von denen die für O mit den (1883) von Wroblewsky gefundenen Größen nahe übereinstimmen. Umgekehrt lassen sich aus den kritischen Größen π, φ und ϑ die Abweichungsgrößen a und b berechnen. So hat Sajotschewski (1879) die kritischen Größen von 17 organischen Flüssigkeiten praktisch bestimmt, woraus Roth (1880) die Größen a und b berechnet; für Stickoxydul N_2O gibt S. $\vartheta = 36$, $\pi = 37$ und $\varphi = 0{,}0582$, woraus $a = 0{,}0324$ und $b = 0{,}0057$.

In seiner „Theorie der übereinstimmenden Zustände“ hat van der Waals (1880) allgemeine und specielle Gesetze über den Zusammenhang der Größen des flüssigen und luftförmigen Zustandes mit den kritischen Größen gefunden, welche die vielgesuchten und doch dunkel gebliebenen Zusammenhänge zwischen Siedepunkten, Dampfspannungen u. s. w. mehr und mehr zu enthüllen versprechen. Das allgemeine Gesetz heißt: **Die Zustandsgleichungen aller Gase und Flüssigkeiten werden identisch, wenn man Druck, Volumen und Temperatur in Theilen ihrer kritischen Werthe ausdrückt.** Beweis: Setzen wir Druck, Volumen und Temperatur als Vielfache ihrer kritischen Werthe, also $p = \varepsilon\pi$, $v = n\varphi$ und $1 + \alpha t = m(1 + \alpha\vartheta)$ in die Zustandsgleichung (45) ein, so erhalten wir $(\varepsilon\pi + a/n^2\varphi^2)(n\varphi - b) = Rm\,(1 + \alpha\vartheta)$. Führen wir hierin nun die Werthe für die kritischen Größen ein, also $\pi = a/27b^2$, $\varphi = 3b$ und $1 + \alpha\vartheta = 8a/27bR$, so erhalten wir schließlich **die reducirte Zustandsgleichung** $(\varepsilon + 3/n^2)(3n - 1) = 8m$, in welcher alles verschwunden ist, was zu der Natur eines Körpers gehört, Volumen, Druck, Temp. und die Abweichungsgrößen, während nur die Vielfachzahlen der kritischen Größen übrig geblieben sind, womit der Satz bewiesen ist.

Aus dem allgemeinen Gesetze leitet v. d. Waals eine Reihe von speciellen Gesetzen ab, deren Richtigkeit er durch empirische Zahlen nachweist, und von denen wir drei anführen wollen: 1. Die absoluten Temperaturen, bei denen die Dampfspannungen proportional sind den kritischen Drucken, sind gleich große Theile der absoluten kritischen Temperaturen. Aus vorliegenden Daten berechnet v. d. Waals für Schwefeldioxyd und Aether für einen Fall das $m = 0{,}987$ und $0{,}986$; ebenso nahe stimmen sie für 6 andere Fälle. Aus der Fl. dieses Gesetzes läßt sich auch die Temperatur für eine gegebene Dampfspannung aus den kritischen Größen und umgekehrt berechnen; endlich geht das Dühring'sche Gesetz in das van der Waals'sche über, wenn statt der Siedepunkte bei gleichem Drucke die absolute Temp. bei gleichen Bruchtheilen des kritischen Druckes gesetzt werden; das erstere ist also ein spec. Fall des letzteren. Ueberhaupt werden bei Siedepunktsvergleichungen nicht die Siedepunkte

ei gleichem Drucke, sondern bei gleichen Bruchtheilen des kritischen Druckes zu vergleichen ...ir; indessen sind auch andere Beziehungen der Siedepunkte zu der kritischen Temp. wahrscheinlich; so fand Pawlewski (1882), daß die Differenz zwischen den kritischen und Siedetemp. bei homologen Reihen constant ist. Neuen Forschungen bietet sich hier ein reiches Feld, wo schöne Resultate zu erzielen sind. — 2. Bei denselben Temp. sind die Volumina der Dämpfe und der Flüssigkeiten und somit auch ihre Differenz für alle Körper dasselbe Vielfache des kritischen Volumens. Für Aether, Alkohol, Aceton und Chloroform wird das Gesetz durch bekannte Zahlen bestätigt. Durch Einführung des Molecularvolumens dürften hier besondere Aufschlüsse zu erwarten sein. — 3. Bei denselben Temp. ist für alle Körper das Product aus der latenten Dampfwärme und dem Moleculargewicht proportional der absoluten kritischen Temp. Für Wasser, Aether, Chloroform, Chlorkohlenstoff, Aceton, Schwefelkohlenstoff liegt das Verhältniß des Produktes zu der absoluten kritischen Temp. zwischen ...,15 und 1,44; die noch bestehenden Ungenauigkeiten, die hier größer sind als in anderen Fällen, werden der besonderen Schwierigkeit zugeschrieben, die kritischen Größen experimentell mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Aufg. 654. Um wie viele Grade ist der Schmelzpunkt unter das arithmetische Mittel 426 durch die Mischung erniedrigt bei 1 Zinn und 6 Blei, bei 1 Z. und 1 B., bei 6 Z und ... B.? Aufl.: 46°, 91°, 50°. — A. 655. Black setzte eine gewisse Quantität Eis einer constanten Temp. aus und beobachtete, daß sie 20 Min. Zeit zum Schmelzen, dann 25 Min. bis zum Sieden und dann 134 Min. zum Verkochen brauchte; was folgt hieraus für den Wärmeverbrauch beim Schmelzen und beim Sieden? Aufl.: Schmelzwärme = 80°, Dampfwärme = 536°. — A. 656. 2kg Eis von 0° werden mit 5kg Wasser von 90° gemischt und erzeugen die Mischtemp. 41,6°; wie groß ist die Schmelzwärme des Eises? Aufl.: 79,4°. — A. 657. Welche Temp. erhält 1kg siedheißen Wassers durch Schmelzen von 1kg Schnee von 0°? Aufl.: 20° (Schmelzw. 80). — A. 658. Wie viel kg Eis von 0° muß man zu ...kg Wasser von 100° mischen, damit es bis zum Nullpunkte erkalte? Aufl.: 300 = 80 x; hieraus x = 3,75kg. — A. 659. Wie viel Gramm Eis von 0° muß man zu 120g Wasser von 80° mischen, damit das Gemisch sich um 60° abkühle? Aufl.: 72g. — A. 660. Welche Temp. nimmt ein Gemisch von 3kg Wasser von 65° und 2kg Schnee von 0° an? Aufl.: ...°. — A. 661. Welche Arbeit wird bei der Schmelzung von 1kg Eis verzehrt? Aufl.: 33 920mk. — A. 662. Wie groß ist die bei der Erstarrung von Wasser stattfindende Ausdehnung, wenn nach Bunsen (1870) das sp. G. des Eises = 0,91 674 beträgt? Aufl.: 1,09. — A. 663. Um wie viel nimmt das Vol. von 1l Wasser beim Gefrieren zu? Aufl.: 90ccm. — A. 664. Um wie viel wächst das Eis aus dem 3cm weiten Halse einer gefüllten Literflasche heraus? Aufl.: 12,7cm. — A. 665. Welche Arbeit wird durch die Ausd. von 1kg Wasser beim Gefrieren in der Luft geleistet? Aufl.: $pu = 10{,}328 \,.\, 0{,}09 = 9{,}2952^{mk}$. — A. 666. Nach Schuhmacher und Moseley ist der lineare Ausd.-Coëff. des Eises = 0,00 005 142, also der cubische = 0,00 015 426; wird nun angenommen, daß die Erniedrigung des Gefrierpunktes durch Druck darin besteht, daß die Ausd. des Eises nicht bis zu 1,09, sondern nur um 0,00 015 426 weniger gestattet wird, so kann man die Frage lösen, durch welchen Druck der Gefrierpunkt um 1° niedriger wird, vorausgesetzt, daß man die Zusammendrückbarkeit des Eises kennt; es sei dieselbe z. B. 1 Milliontel durch 1at. Aufl.: So sind ...54at nöthig. — A. 667. Wie viel Wasser erstarrt, wenn 6kg bis auf — 12° unterkühlt sind, und wenn das Gefrieren durch einen Anstoß erfolgt? Aufl.: 0,9kg. — A. 668. Nach den Fln. von Magnus und von Regnault die Spannung von Wasserdampf von 110° zu berechnen und mit Taf. 414 zu vergleichen. Aufl.: Magnus ergibt 1077,2, Regnault ...085,3, die Tabelle 1075mm. — A. 669. Wie groß ist der Druck von Wasserdampf von ...50° auf 1qm? Aufl.: 48664kg. — A. 670. Von der Oberseite eines Dampfkessels geht ein Rohr nach außen tief herab; wie viel wird in dessen offenem Schenkel Wasser höher stehen als in dem geschlossenen, wenn die Kesseltemp. 115° beträgt? Aufl.: 6,9m. — A. 671. Wie viel wird es in dem geschlossenen Schenkel höher stehen, wenn die Temp. auf 60° gesunken ist? Aufl.: 8,3m. — A. 672. Welchen Druck von außen hat ein Dampfkessel von 8qm Oberfläche zu tragen, wenn die Temp. im Kessel auf 70° gesunken ist? Aufl.: 57283kg. — A. 673. In der Fl. (44) für das combinirte Mariotte- und Gaylussac'sche Gesetz ist die Constante $p_0 v_0 = 1{,}2077$; wie groß ist nach dieser Fl. das Vol. v von 1cbm überhitzten Dampfes von 200°C und 4at Spannung, und wie groß berechnet sich dasselbe Vol. nach Zeuners Fl., welche die Geltung jenes Gesetzes nicht voraussetzt? Aufl.: 0,5232 und 0,5164, eine starke Abweichung. — A. 674. Gesetzt, man schließe 1kg = 1,6504cbm gesättigten Wasserdampf von 200° vom Wasser ab und erwärme ihn bei gleichbleibendem Vol. auf ...00°; welche Spannung wird er nach der früher fäschlich vorausgesetzten Geltung des M.-G.'schen Gesetzes und welche nach Zeuners Fl. haben? Aufl.: 1,8 und 1,9at. — A. 675. Wie groß ist das Vol. von 1kg gesättigten Dampfes von 100°, wenn nach Zeuners Tabellen das Gewicht von 1cbm Dampf = 0,6059kg beträgt? Aufl.: 1,6504cbm. — A. 676. Wie groß ist dies spec. Vol. bei 60°, bei 150°, bei 190°, wenn die betreffenden Gewichte

0,13, 2,6 und 6,4 betragen? Aufl.: 7,7^{cbm}, 0,38^{cbm} und 0,15^{cbm}. — A. 677. Welchen Zusammenhang hat dieses spec. Vol. Zeuners mit dem älteren Begriffe des spec. Vol.? Aufl.: Das ältere spec. Vol. betrug 1700 für 100^0, d. h. eine gewisse Dampfmenge von 100^0 nimmt einen 1700 mal größeren Raum ein als das Wasser von 0^0, aus dem sie entstanden ist; 1^{kg} Wasser von 0^0 hat 1^{cbdm} Volumen; 1^{kg} Dampf hat demnach 1700^{cbdm} = 1,7^{cbm} Vol., während das spec. Vol. Zeuners für dasselbe Dampfgewicht nur 1,6504^{cbm} angibt; demnach sind die beiden Begriffe leicht zu vereinigen, nur sind die älteren Zahlen ungenau. — A. 678. Die Ungenauigkeit der älteren spec. Vol. rührte von der Annahme her, daß die Wasserdampfdichte für alle Temp. constant = $^5/_8$ sei, und daß für gesättigten Dampf das M.-G.'sche Gesetz gelte; unter dieser Annahme das ältere spec. Volumen für 100^0 zu berechnen? Aufl.: 1^l Luft von 100^0 wiegt 1,293 / (1 + 0,3665)^g; 1^l Dampf = 1,293 . 0,6235 / (1 + 0,3665)^g; daher ist das Vol. von 1^g Dampf von 100^0 = 1,3665 : 1,293 . 0,6235 = 1,695^l = 1695^{ccm}; 1^g Wasser = 1^{ccm}; daher das alte spec. Vol. = 1695. — A. 679. Das spec. Vol. für Dampf von 2^{at} nach der älteren und der neueren Anschauung zu berechnen? Aufl.: 1^{kg} Dampf = (1 + 0,003 665 . 121) / (1,293 . 2 . 0,6235) = 0,893^{cbm}; 1^{kg} Wasser = 0,001^{cbm}; also das ältere spec. Vol. = 894. Das neuere = 1 / 1,1631 = 0,859^{cbm}, also wieder eine starke Abweichung. Die Zahl 1,1631 ist nach Zeuners Tabellen das Gewicht von 1^{cbm} Dampf. — A. 680. Das Gewicht von 1^{cbm} Dampf von 100^0 und 120^0 nach der älteren Methode zu berechnen? Aufl.: 1^{cbm} Luft von 100^0 wiegt 1,293 / (1 + 0,3665)^{kg} = 0,9462^{kg}, also 1^{cbm} Dampf 0,5899^{kg}. Für 121^0 muß auch noch der Spannungsunterschied berücksichtigt werden; 1^{cbm} Dampf wiegt dann 1,293 . 0,6235 / 2 (1 + 0,003 665 . 121) = 1,117^{kg}, während Zeuners Tabellen 1,1631^{kg} angeben. — A. 681. Die Dichte des Stickstofforydes theoretisch zu bestimmen? Aufl.: Dieses Gas besteht aus 1 Vol. N = 0,969 und 1 Vol. O = 1,108; daraus folgt 1 Vol. Gas = 1,0385, übereinstimmend mit Versuchen. — A. 682. Bei welcher Temp. siedet Wasser unter 0,1^{at}? Aufl.: 46,2^0 nach Tab. 414. — A. 683. Nach der Fl. von Magnus zu finden, bei welcher Temp. Wasser unter einem Drucke von 100^{at} sieden würde? Aufl.: 307^0. — A. 684. Aus der Fl. für barometrische Höhenmessung h = 18 404 (log b — log b'), worin b und b' die Barometerstände am Fuße und auf der Höhe bedeuten, sowie nach Kemps Regel (s. 418.) die Höhe eines Berges zu berechnen, an dessen Fuße das Wasser bei 99^0 und auf dessen Gipfel solches bei 91^0 siedet? Aufl.: Nach Tab. 414. entsprechen diesen Siedepunkten die Barometerstände 733,2 und 545,7, woraus nach der Fl. h = 2360^m und nach Kemps Regel 2328^m. — A. 685. Leitet man 3^{kg} Dampf von 100^0 in 150^{kg} Wasser von 20^0, so erwärmt sich das Ganze auf 32^0; wie groß ist die Dampfwärme des Wassers? Aufl.: 150 . 12 = 3 . x + 3 . 68; hieraus x = 532^c. — A. 686. Man leitet 1^{kg} Aetherdampf von 35^0 durch ein Schlangenrohr, das in 10^{kg} Wasser von 10^0 liegt; der Aether fließt mit 35^0 ab, das Wasser steigt auf 19^0; wie groß ist die Dampfwärme des Aethers? Aufl.: 90^c. — A. 687. Welche Temp. erhalten 100^{kg} Wasser von 10^0, wenn in dasselbe 4^{kg} Dampf von 120^0 geleitet werden? Aufl.: 35,1^0. — A. 688. Welche mechanische Arbeit wäre nöthig, um 1^{kg} Wasser von 100^0 in Dampf von 100^0 zu verwandeln, falls diese Verwandlung durch solche Arbeit möglich wäre? Aufl.: 227 476^{mk}. — A. 689. Welche Arbeit entsteht, wenn 1^{kg} H und 8^{kg} O sich vereinigen, und wenn die Verbindung allmählig durch Abkühlung zu Eis wird? Aufl.: (34 000 + 9 . 636 + 9 . 80 — 93) 424 = 17 Mill. mk. — A. 690. Die äußere Dampfwärme des Wasserdampfes von 100^0 zu berechnen. Aufl.: Apu = 10 328 . 1,6504 / 424 = 40^c. — A. 691. Die in 419. erwähnte wichtige Formel für die Dampfwärme der Volumeneinheit lautet r = AT (dp / dt); die Bedeutungen von A und T sind bekannt; (dp / dt) bedeutet den Differentialquotienten der Dampfspannung p in Bezug auf die Temp. t, welcher nach Magnus Fl. p . 7,4475 . 234,69 / (234,69 + t)^2 . log nat 10 ist; wie groß ist hiernach die Dampfwärme des Wasserdampfes von 100^0? Aufl.: dp / dt = 760 . 7,4475 . 234,69 . 2,3 025 851 / 343,69^2 = 27,305^{mm} Quecks. = 371,07^{kg} auf 1^{qm}; daher r = 371,07 . 373 / 424 = 326^c für 1^{cbm} Dampf; da aber 1^{kg} Dampf = 1,6504^{cbm}, so ist r für 1^{kg} = 326 . 1,6504 = 538^c. Dieser Werth ist etwas zu groß, weil r eigentlich nicht für 1^{cbm} Dampf, sondern für die Differenz dieses 1^{cbm} Dampf und des entsprechenden Wasservol. gilt; wird dies berücksichtigt, so ergibt sich genau 536. — A. 692. Der Kolbendurchm. einer Hochdruckmasch. sei = 48^{cm}, die Hubhöhe des Kolbens in jeder Sec. = 120^{cm}, die Temp. des Dampfes sei 130^0; wie groß ist der absolute Effect, der Nutzeffect, der Wasserbedarf und der Kohlenbedarf der Masch., unter der allerdings ungenauen Voraussetzung, daß der gesättigte Dampf auch während der Arbeit dem Mariotte'schen Gesetze folge? Aufl.: Abs. Eff. = 0,24^2 . 3,1416 . ((2030 — 760) / 760) 10328 . 1,2 / 75 = 49,968^e; Nutzeff. gewöhnlich $^1/_2$ des abs. Eff., also = 24^e; Dampfbedarf in 1 Sec. = 0,24^2 . 1,2 = 0,06 812^{cbm} von 130^0; 1^{cbm} Dampf von 130^0 wiegt nach Zeuner 1,542^{kg}, also Wasserbedarf in 1 Sec. = 0,06 912 . 1,542 = 0,10 658^{kg}, also in 1 Stunde 383 668^{kg}. Kohlenbedarf: Dampfwärme von 1^{kg} Dampf von 130^0 = 646^c, von 383,688^{kg} = 383,688 . 646^c; 1^{kg} Kohle gibt 1200^c; daher Kohlenbedarf = 383,688 . 646 / 1200 = 206,42^{kg}. — A. 693. Zu

einer Dampfm. mit Condensation sei die Dampftemp. 108°, der Kolbenradius 40^{cm}, der Kolbenhub 140^{cm}, die Zahl der Kolbenspiele in 1 Min. 36; der Gegendruck im Condensator sei 0,1^{at}; wie groß ist der abs. Eff.? Aufl.: $0,4^2 . 3,1416 ((1005 - 760) / 760) 10\,328 . (1,4 . 36 / 60) / 75 = 71,073$°. — A. 694. Den Effect einer Expansionsmasch. unter den bekannten, sehr ungenauen Voraussetzungen der älteren Theorie annähernd zu berechnen, wenn die Expansion nach ¼ Kolbenhub beginnt, wenn der Ueberdruck 1^{at}, die Kolbenfläche ½^{qm}, der Hub 1^{m} in 1 Sec. beträgt? Aufl.: Druck im ersten Hubviertel 1^{at}, im 2ten $(1 + \frac{1}{2}) / 2 = \frac{3}{4}^{at}$, im 3ten $(\frac{1}{2} + \frac{1}{3}) / 2 = \frac{5}{12}^{at}$, im 4ten $(\frac{1}{3} + \frac{1}{4}) / 2 = \frac{7}{24}^{at}$, zusammen $= \frac{61}{24}^{at}$, also im Mittel $= \frac{61}{96}^{at} = \frac{1}{2} \cdot \frac{61}{96} \cdot 10\,328 = 3281^{kg}$, daher Effect $3281 . 1^{mk} =$ ca. 40°.

5. Dritte Hauptwirkung der Wärme.

Die Erwärmung.

427 **Die specifische Wärme** (Wilcke 1762). Unter der spec. W. eines Körpers versteht man die Wärmemenge in Calorien ausgedrückt, welche einem Kilogramm des Körpers zugeführt werden muß, um seine Temperatur um 1° zu erhöhen. Da 1° die zur Erwärmung von 1^{kg} Wasser um 1° nöthige Wärmemenge ist, so gibt die sp. W. auch an, wieviel mal soviel Wärme ein gewisses Gewicht eines Körpers zu einer bestimmten Temperaturerhöhung bedarf als ein gleiches Gewicht Wasser zu gleicher Erwärmung. Man stellt übrigens auch dieselbe Frage für gleiche Volumina auf und unterscheidet demnach die specifische Volumenwärme von der specifischen Gewichtwärme; doch versteht man unter sp. W. kurzweg immer die letztere.

Gemäß der neueren Wärmelehre ist die Temp. bekanntlich nichts Anderes als die leb. Kft. der Mol. und der At. innerhalb der Mol.. Da die Mol. aus den At. bestehen, so führen die At. auch die Bewegungen der Mol. aus; demgemäß läßt sich auch kurz sagen: die Temp. ist die leb. Kft. der At. In verschiedenen Körpern von gleicher Temp. haben demnach die At. eine gleiche leb. Kft.; die At. von geringerer Masse ersetzen dieselbe durch größere Geschw. Demnach besteht auch die Temperaturerhöhung in einer Vermehrung der leb. Kft. der At., und eine Temperaturerhöhung um 1° ist in den verschiedensten Körpern eine gleiche Vermehrung der leb. Kft. der At. Beständen die Körper aus isolirten At., die keine Wirkung auf einander ausüben, so würde in den verschiedensten Körpern für eine gleiche Temperaturerhöhung einer und derselben Anzahl von At. eine gleiche Wärmemenge erforderlich sein. Nun üben aber sowohl die Mol. auf einander, als auch die At. in den Mol. auf einander eine anziehende Wirkung aus. Hierdurch wird der eben angeführte Schluß wesentlich geändert; denn die einem Körper zugeführte Wärme erhöht nicht blos die Temp., die leb. Kft. der At., sondern sie entfernt auch die Mol. weiter von einander, leistet also innere Arb. der Mol., sie entfernt die At. in den Mol. weiter von einander, leistet dadurch innere Arbeit der At., und dehnt endlich den Körper aus, schiebt den äußeren Druck zurück, leistet also auch äußere Arbeit. Da nun die Anz. und Entf. der At. und Mol. in den verschiedenen Körpern verschieden ist, und auch die Ausd. durch die Wärme bekanntlich nicht dieselbe bei allen Körpern ist, so wird selbst bei einer gleichen Anzahl von At. verschiedener Körper durch eine und dieselbe zugeführte Wärmemenge eine verschiedene innere und äußere Arbeit geleistet, so daß eine verschiedene Wärmemenge zur Erhöhung der Temp. übrig bleibt und daher eine verschiedene Erhöhung der Temp. erfolgt. Umgekehrt, wenn eine gleiche Anzahl von At. verschiedener Körper dieselbe Temperaturerhöhung erfahren soll, so muß zwar für diese Erhöhung an sich eine gleiche Wärmemenge zugeführt werden, für die mit dieser Erhöhung aber unvermeidlich verbundene innere und äußere Arbeit muß, weil dieselbe für verschiedene Körper verschieden ist, eine verschiedene Wärmemenge zur Verwendung kommen. Da nun diese zwei für die Erhöhung der Temp. und für die Arbeit nöthigen Wärmemengen noch nicht geschieden werden können, und da wir sonach gezwungen sind, in die zur Erwärmung nöthige Wärme diese beiden Wärmemengen einzubegreifen, so müssen wir auch die Folgerung zugestehen, daß zur Erwärmung gleicher Atomzahlen verschiedener Körper verschiedene Wärmemengen nöthig sind. Könnte man jedoch die für innere und äußere Arbeit nöthige Wärme aus der zugeführten nöthigen Wärme ausscheiden, so würde die eigentliche Erwärmungswärme, die ausschließlich zur Erhöhung der leb. Kft. der At. erforderliche Wärme übrig bleiben, und diese müßte offenbar für eine gleiche Atomzahl verschiedener Körper dieselbe sein, weil eben für jedes isolirte At. dieselbe Wärme zu gleicher Erwärmung nöthig ist. Die mechanische Wärmetheorie hat diese Wärme, die nur zur Erhöhung der leb. Kft., also nur zur Erwärmung der Körper nöthig ist, in die theoretische

Physik eingeführt. Rankine nennt sie die wahre sp. W., Clausius hat den Namen Wärmecapacität, der früher gleichbedeutend mit sp. W. gebraucht wurde, für dieselbe vorgeschlagen. Für dieselbe ergeben sich leicht folgende Sätze: Die Wärmecapacität der At. verschiedener Körper ist dieselbe und constant; denn zu gleicher Erhöhung der leb. Kft. eines At. ist unter allen Umständen und Temp., so lange das At. isolirt bleibt, dieselbe Wärme nöthig. Die Wärmecapacität der Atomgewichte der Elemente ist gleich groß und constant; denn die Atomgewichte verschiedener Elemente enthalten gleiche Atomzahlen, bedürfen daher auch, so lange die At. als auf einander wirkungslos vorausgesetzt werden, gleicher Wärmemengen zu gleicher Temperaturerhöhung. Die Wärmecapacitäten von Mol., die gleich viele At. enthalten, sind einander gleich, und sind gleich der Wärmecapacität eines At., multiplicirt mit der Zahl der At.; die Wärmecapacitäten von Molekulargewichten solcher Verbindungen, welche gleich viele At. in ihren Mol. enthalten, sind gleich groß und werden erhalten, indem man die Wärmecapacitäten der Bestandtheile addirt. Die Wärmecapacitäten gleicher Gasvol., deren Mol. gleich viele At. enthalten, sind einander gleich und constant; denn gleiche Gasvol. enthalten nach Avogadros Gesetz gleich viele Mol.; bestehen nun in gleichen Vol. verschiedener Gase die Mol. aus gleich vielen At., so enthalten die Gasvol. gleich viele At., bedürfen also auch gleicher Erwärmung zu gleicher Erhöhung ihrer leben. Atomkräfte. Diese und noch andere Sätze gelten nun zwar für die Wärmecapacität, also unter Voraussetzung, daß weder innere Arbeit der At. und Mol., noch äußere Arbeit stattfindet, nicht aber für die spec. W., weil in diese alle zugeführte Wärme, also auch die für innere und äußere Arbeit verzehrte, einbegriffen ist; sie gelten jedoch für die spec. W. mit gewissen Annäherungen und Beschränkungen, die eben von der inneren und äußeren Arbeit herrühren, und in manchen Fällen stark, in anderen schwach auf die Geltung jener Gesetze für die sp. W. Einfluß üben. Sie nehmen für die sp. W. folgende Gestalt an:

428 1. Gesetz von Dulong und Petit (1818): Die specifischen Wärmen der Atomgewichte oder die Atomwärmen der Elemente sind nahe einander gleich und zwar durchschnittlich gleich 6,4.

Solche Gewichtsmengen verschiedener Elemente, welche den Atomgewichten derselben proportional sind, enthalten nach dem Begriff der Atomgewichte gleich viele At., bedürfen daher, abgesehen von der inneren und äußeren Arbeit, zu gleicher Erwärmung einer und derselben Wärmemenge. Da jedoch zugeführte Wärme nicht blos erwärmt, sondern auch innere Arbeit der At. und Mol. leistet, welche bei verschiedenen Elementen verschieden sein muß, und außerdem die Elemente bei gleicher Erwärmung verschieden stark ausdehnt, also eine verschiedene äußere Arbeit leistet, so muß die Gleichheit der spec. W. der Atomgewichte gestört werden. Indessen ist die Hauptwirkung der zugeführten Wärme dennoch die Erwärmung, da die Ausdehnung z. B. bei der Erwärmung um 1° doch im Verhältnisse zu dieser Erwärmung gering, und daher, wie Buff (1877) speciell nachgewiesen hat, die innere und äußere Arbeit nicht bedeutend und ihre Verschiedenheit demnach noch weniger bedeutend ist; daher kann die Störung der Gleichheit der spec. W. der Atomgewichte der Elemente durch die Arbeit nur eine geringe sein. Multiplicirt man die Atomgewichte der verschiedenen Elemente mit den sp. W. derselben, wie es Dulong und Petit zuerst gethan, so entstehen Producte, die annähernd einander gleich und zwar durchschnittlich = 6,4 sind und die sp. W. der Atomgewichte angeben. Weil man früher hinter dieser annähernden eine absolute Gleichheit vermuthete, so wurden die Versuche zur Bestimmung der Atomgewichte und der sp. W. zahlreich wiederholt und die Methoden zu den höchsten Graden der Genauigkeit angespannt, jedoch ohne das Ziel zu erreichen; erst die mechanische Wärmetheorie zeigte die Unmöglichkeit der absoluten Gleichheit. Wäre die Gleichheit eine absolute, so könnte man für neue Elemente die sp. Wärme berechnen, indem man einfach das Product 6,4 durch das Atomgewicht zu dividiren hätte, oder man könnte das Atomgewicht berechnen, indem man das Product 6,4 durch die specifische Wärme dividirt. Bei dem Mangel der absoluten Gleichheit sind diese Rechnungen zwar nicht zulässig; sie gewähren jedoch häufig ein ganz sicheres Mittel, über das Atomgewicht eines Elementes Gewißheit zu erhalten, da man häufig im Zweifel ist, ob dasselbe wirklich gleich einer durch Versuche, z. B. durch die Dampfdichte gefundenen Zahl oder gleich dem Zweifachen oder gleich der Hälfte derselben ist, worüber man jedenfalls durch die erwähnte Division Aufschluß erhält.

Indessen zeigt auch die annähernde Gleichheit der Atomwärmen der Elemente einige höchst auffällige und bisher unerklärliche Ausnahmen, nicht blos bei den Gasen, welche durchgängig eine viel niedrigere Atomwärme als die festen Elemente besitzen, und noch einer speciellen Betrachtung bedürfen, sondern auch bei drei festen Elementen, indem Kohlenstoff, Bor und Silicium nach allen älteren Bestimmungen eine viel kleinere Atomwärme als 6,4 haben, und zwar C unter verschiedenen Umständen 1—3, B etwa 4 und Si ca. 5. Kopp (1865) nimmt zur Erklärung dieser Abnormität seine Zuflucht zu dem schon oft vermutheten Urstoff oder zu mehreren Urstoffen, in welche die At. der El. wohl noch zerlegbar sein dürften.

Die Gleichheit der meisten festen El. in der erwähnten Beziehung scheine erklärlich, wenn deren At. eine gleiche größere Anzahl, etwa 6, Urstoffatome enthielten, während das Si-At. aus nur 5, das B-At. aus 3, das C-At. aus 2 solcher Urstoffat. gebildet wären und dadurch eine geringere Atomwärme besitzen müßten. Zu denselben Folgerungen gelangte in neuester Zeit H. F. Weber. Derselbe hat schon (1872) gefunden, daß die verschiedenen Angaben über die Atomwärme des C davon herrühren, daß die Untersuchungen bei verschiedenen Temp. angestellt wurden, indem nach seinen Versuchen die spec. W. des Diamantes von 0 bis 200° sich auf die dreifache Größe steigerte. Neuere Untersuchungen (1875) ergaben folgende merkwürdige Resultate: Wenn sich die Temp. von —50 bis 600° erhöht, so steigt die sp. W. des C auf den 7fachen, die des B auf den 3fachen Betrag, und die des Si zwischen —50 und 200° auf den zweifachen Betrag. Das Steigen wird jedoch gegen die erwähnten höchsten Temp. zu immer schwächer, und von diesen höchsten Temp. an bleibt die sp. W. nahezu constant. Diese constant bleibenden Endwerthe sind 0,46; 0,50; 0,205; multiplicirt man dieselben mit den betreffenden Atomgewichten 12, 11 und 28 der El., so ergibt sich nahezu das Product 6. Die Atomwärme der drei abweichenden El. nähert sich also bei den höchsten Temp. der allgemeinen Atomwärme 6 aller festen El., sie gelangen bei diesen Temp. ebenfalls in das Gültigkeitsbereich des Dulong-Petit'schen Gesetzes. Jedoch muß nach Weber das Gesetz in folgender Gestalt ausgesprochen werden: „Die specifischen Wärmen der festen Elemente variiren mit der Temp.; für jedes Element gibt es aber einen Punkt T_0 in der Temperaturskala, von welchem an die Veränderlichkeit der sp. W. mit wachsender Temp. ganz unbedeutend wird. Das Product aus dem Atomgewicht in denjenigen Werth der sp. W., welcher den Temp. $T > T_0$ zukommt, liefert für alle festen Elemente einen nahezu constanten, zwischen 5,5 und 6,5 liegenden Werth." Da die innere Arbeit der At. und Mol. unmöglich die starke Veränderlichkeit der sp. W. des C bewirken kann, so ist nach Weber die Ursache dieser Veränderlichkeit innerhalb des Atoms zu suchen, was nur durch eine Veränderlichkeit in der Constitution des Atoms erklärlich scheint und offenbar auch eine „wechselnde Valenz" oder „Polyvalenz" des C wahrscheinlich macht.

Zu den abweichenden El. gehören auch die elementaren Gase, da dieselben im freien gasförmigen Zustande meist eine bedeutende geringere Atomwärme als 6 besitzen z. B. O, H u. N zwischen 2 und 3, wenn sie keine äußere Arbeit leisten, und selbst wenn diese hinzugerechnet wird, höchstens 3—4. Diese Abweichung ist ebenfalls nicht durch innere Arbeit erklärbar, da nur eine sehr kleine innere Arbeit der Mol. bei den Gasen angenommen werden kann, und da die innere Arbeit der At. unmöglich den großen Unterschied erzeugen kann. Die meisten elementaren Gase haben indeß nach Kopp im festen Zustande z. B. Cl im Kochsalz, N im Salmiak, wie man leicht nach Gesetz 2. berechnen kann, die Atomwärme 6; O u. H dagegen bleiben auch hierin abweichend; ihre Atomwärme in festen Verbindungen ergibt sich nur = 4 und 3.

Da die Atomwärme 6,4 der festen El. ein Maß ist für die leb. Kft., die einem At. für die Erwärmung um 1° zugeführt werden muß, und da diese leb. Kft. nur durch die Arbeiten verändert wird, so muß sie auch in Verbindungen constant bleiben und kann in denselben höchstens durch Veränderungen der Arbeit kleine Abweichungen annehmen. Die festen El. treten also mit ungeänderten Atomwärmen in die Verbindungen ein (Kopp 1865). Dieser dem Gesetze von Dulong und Petit entsprechende Satz ist die Grundlage des Neumann'schen Gesetzes. Die abweichenden El. C, B u. Si behalten nach Weber (1875) ihre Abweichungen auch in den Verbindungen. Die gasförmigen El. behalten nach Kopp die oben angegebenen Atomwärmen des festen Zustandes in allen festen Verbindungen, weichen also hierdurch auch von dem Kopp'schen Grundsatze ab.

2. **Gesetz von Neumann** (1831). Die Molekulargewichte der festen chemischen Verbindungen, deren Moleküle aus einer gleichen Anzahl von Atomen zusammengesetzt sind, haben annähernd gleiche specifische Wärme. Berücksichtigt man die Abweichungen der Elemente von Gesetz 1., so sind die Molekularwärmen der festen chemischen Verbindungen gleich den Summen der Atomwärmen ihrer Elemente; bei den Verbindungen der dem Gesetz 1. folgenden Elemente sind die Molekularwärmen annähernd gleich dem so Vielfachen der Atomwärme 6,4, als das Molekül Atome enthält (Kopp 1865). Die sp. W. der Legirungen sind gleich dem Mittel der sp. W. der Bestandtheile (Regnault 1841).

Die Molekulargewichte der Verbindungen sind die Gewichte gleicher Anzahlen von Mol.; sind nun in den verschiedenen Mol. gleich viele At., so enthalten auch die Molekulargewichte gleich viele At., bedürfen daher abgesehen von der inneren und äußeren Arbeit zu gleicher Erwärmung einer gleichen Wärmezufuhr. Wird aber, wie es bei der sp. W. der Fall ist, hiervon nicht abgesehen, so ist aus denselben Gründen wie bei den Elementen, die innere

und äußere Arbeit bei gleicher Temperaturerhöhung verschieden, wodurch die Gleichheit der sp. W. gestört wird. Neumann fand das Gesetz zunächst für Oxyde von den Formen RO und R^2O^3, für Schwefelmetalle von der Form RS, für kohlensaure und schwefelsaure Salze der Basis RO; doch fand er, wie jetzt erklärlich ist, keine absolute Gleichheit. Auch ergab sich für die Basen RO nicht das Zweifache und für die Basen R^2O^3 nicht das Fünffache der Atomwärme 6,4, einfach deßhalb, weil für O das Gesetz 1. nicht gilt. Die noch zahlreicheren Untersuchungen von Regnault und Kopp bestätigten das Neumann'sche Gesetz. Kopp machte insbesondere darauf aufmerksam, daß für die Verbindungen der El., die dem Dulong-Petit'schen Gesetze folgen, die Molekularwärme sich einfach aus der Atomwärme berechnen läßt, indem man diese mit der Zahl der At. multiplicirt, und daß die so berechneten Molekularwärmen nicht weit von den Versuchsresultaten abweichen. So haben die zweiatomigen Schwefel- und Chlorverbindungen meistens die Molekularwärme 12, die dreiatomigen 18 u. s. w.; meistens sind hier wie auch in den folgenden Gesetzen die Versuchsresultate kleiner als die Resultate der Rechnung, was darauf hinweist, daß die innere Arbeit bei den Verbindungen kleiner als bei den El. ist, daß also, wie schon erwähnt, verschiedene At. und Mol. sich schwächer anziehen als gleiche, und wodurch sich erklärt, daß das Neumann'sche Gesetz durchgängig genauer gilt als das von Dulong und Petit. Natürlich darf man die oben angegebene Methode nicht für die Verbindungen der abnormen El. anwenden; führt man jedoch die abnorme Atomwärme derselben in die Rechnung ein, so stimmen die Resultate wieder nahe mit denen der Experimente. So ergibt sich für Verbindungen von der Form RO, wenn wir für O die durchschnittliche Atomwärme 4 setzen, durch Rechnung die Molekularwärme 10, für R^2O^3 erfolgt 24, Zahlen, von denen die Versuchsresultate nicht erheblich abweichen. Selbst für sehr complicirte Verbindungen gelten die beiden Methoden; so hat Kryolith ($AlNa_3Fl_6$) die Molekularwärme 50, nur wenig kleiner als die berechnete 60, Feldspath 105, nur wenig kleiner als die berechnete 118.

Aus dem Neumann'schen Gesetze folgt, daß man die Atomwärme und daher die sp. W. eines elementaren oder zusammengesetzten Bestandtheiles aus den Atomwärmen einer Verbindung und der übrigen Bestandtheile nahezu berechnen kann: subtrahirt man die Atomwärme dieser Bestandtheile von der der Verbindung, so erhält man die Atomwärme des ersten Bestandtheiles, und durch Division derselben mit seinem Atomgewicht ergibt sich seine sp. W. Die Molekularwärme von Kochsalz ist 12; zählt man hiervon die des Natriums = 6 ab, so bleibt für das Chlor in festen Verbindungen 6 übrig. Da die Molekularwärme von RO durchschnittlich 10, so ergibt sich die von O = 4; hierdurch erhält man aus der Molekularwärme 9 des Eises für H = 2,5.

3. **Gesetz von Delaroche und Bérard (1813): Gleiche Volumina verschiedener Gase, deren Moleküle aus gleich vielen Atomen zusammengesetzt sind, haben annähernd gleiche specifische Wärme, oder ihre Volumwärmen sind annähernd einander gleich; die Volumwärmen anderer Gase und Dämpfe stehen zu diesen ungefähr in demselben Verhältnisse wie die Atomzahlen in den Molekülen.**

Gleiche Vol. verschiedener Gase und Dämpfe enthalten nach Avogadros Gesetz gleich viele Mol.; sind nun in jedem Mol. gleich viele At., so sind auch die Atomzahlen in gleichen Vol. gleich groß; folglich bedürfen auch, wenn die Atomwärmen der verschiedenen Gase einander gleich sind, die gleichen Vol. derselben Wärme zu gleicher Erhöhung ihrer leb. Kt. Nun ist aber außerdem die Ausdehnung aller luftartigen Körper durch die Wärme nahezu dieselbe; folglich vollbringen sie bei ihrer Erwärmung, wenn sie nur den Luftdruck überwinden, fast gleiche äußere Arbeit. Die innere Arbeit der Mol. ist, da nach der mechanischen Gastheorie die Anz. derselben äußerst klein ist, fast nicht vorhanden, folglich wird die Gleichheit der Volumwärmen durch die innere Arbeit der Mol. und die äußere Arbeit nur sehr wenig gestört. Eine innere Arbeit der At. ist jedoch vorhanden, da die At. in den Mol. einander so nahe sind, daß sie sich anziehen, und weil durch die Erwärmung die At. von einander entfernt werden; die hierfür nöthige Arbeit kann in verschiedenen Mol. verschieden sein, und ist sogar in den elementaren Gasen vorhanden, weil deren At. ebenfalls Mol. bilden. Dies wird durch die schon angegebene Vergleichung einer Verbrennung von C in O und NO angezeigt: denn in O entsteht eine kleinere Verbrennungswärme als in NO; es wird also zur Trennung der Sauerstoffatome von einander mehr innere Arbeit geleistet als zu ihrer Trennung von den Stickstoffatomen. Die O-Atome müssen sich demnach stärker anziehen, als N- u. O-Atome; demnach ist die innere Arbeit, welche bei der Erwärmung von Gasen geleistet wird, verschieden, sie verbraucht eine verschiedene Wärmemenge, wodurch die Gleichheit der Volumwärmen gestört wird. Diese Störung kann aber nur gering sein, da sie eben nur von geringen Arbeiten herrührt. So ist, wenn die Volumwärme von $H_2 = 1$ ist, die von $O_2 = 1,029$, die von $N_2 = 0,995$. Stickoxyd, Salzsäure und Kohlenoxyd haben wie die eben genannten El. zweiatomige Mol.; ihre Volumwärme ist daher nahezu eben

so groß, für NO = 1,027, für HCl = 0,982, für CO = 1,008; Stickoxydul, Kohlendioxyd und Schwefeldioxyd haben dreiatomige Mol.; ihre Volumwärmen sind daher nahezu das 1 $^3/_2$fache von 1, für N_2O = 1,649, für CO_2 = 1,569, für SO_2 = 1,6. Cyanäthyl (C_3H_5N) enthält 9 At., seine Atomwärme 4,403 ist nahezu das $^9/_2$fache von 1 u. s. w. Leicht ist aus diesen Zahlen, besonders aber aus ausführlicheren Tabellen zu entnehmen, daß die Gleichheit der Volumwärmen und die Vielfachheit derselben um so mehr gestört wird, je coercibler und je zusammengesetzter die Mol. der Gase sind; im letzten Falle sind größere Verschiedenheiten der inneren Arbeiten der At. zu erwarten, im ersteren scheint die Nähe des flüssigen Zustandes verändernd einzuwirken.

Diese Gleichheit würde wegen der geringen Arbeit noch schärfer hervortreten, wenn die Grundbedingung, die Gleichheit der Atomwärmen, das Dulong-Petit'sche Gesetz allgemeine Geltung hätte; bei den gewöhnlichen Gasen O, N und H und ihren Verbindungen tritt sie trotz derer Abweichung von diesem Gesetze deutlich hervor, weil dieselben unter sich die gleiche Atomwärme 2,4 haben. Sie gilt natürlich nicht blos für den Fall, daß die Gase die äußere Arbeit der Ueberwindung des Luftdruckes leisten, also sich frei unter constantem Drucke ausdehnen, sondern auch für den Fall, wenn die Gase keine äußere Arbeit leisten, indem sie in ein const. Vol. eingeschlossen sind; im letzten Falle ist die Volumwärme, wie auch die sp. W. geringer, und zwar um so viel, als die äußere Arbeit, die am Luftdrucke geleistet wird, in Wärmemaß ausgedrückt geringer ist. Wie hieraus ersichtlich, muß man die sp. W. der Gase bei const. Vol. wohl unterscheiden von deren sp. W. bei const. Drucke. Die oben angeführten Zahlenbeispiele gelten für const. Vol.

4. Gesetz von Wilcke (1772): Die specifischen Wärmen verschiedener Körper sind verschieden; z. B. die sp. W. des Quecksilbers ist $^1/_{29}$, des Eisens $^1/_9$, des Lithiums $^9/_{10}$, des Wasserstoffs = 3; zur Erwärmung von 1^{kg} Wasser ist 29mal soviel Wärme nöthig als zu gleicher Erwärmung von 1^{kg} Quecksilber.

Die At. der verschiedenen Körper haben bekanntlich das verschiedenste Gewicht; folglich enthält 1^{kg} der verschiedenen Körper eine sehr verschiedene Anzahl von At.; da nun die At. meist gleiche Atomwärme haben, so bedarf 1^{kg} verschiedener Körper zu gleicher Temp. einer verschiedenen Wärmemenge. Die Verschiedenheit innerer und äußerer Arbeit mag diese Ungleichheit ändern, wird sie aber keineswegs aufheben. Bestände die abnorme sp. W. nicht, so ließen sich die sp. W. aller Körper ausrechnen, indem man z. B. die sp. W. von H mit dem Atomgewicht multiplicirt. Indessen auch jetzt stehen die meisten sp. W. im umgekehrten Verhältnisse zu den Atomgewichten; so sind die sp. W. von Hg, Fe und Li ($^1/_{29}$, $^1/_9$ u. $^9/_{10}$) umgekehrt proportional den Atomgewichten 200, 56, 7 (Dulong-Petit).

Mischt man 1^{kg} Wasser von 80° mit 1^{kg} Hg von 20°, so erhält das Gemisch eine Temp. von 78°; das kg Wasser hat demnach seine Temperatur nur um 2° erniedrigt, das kg Hg dagegen die seinige um 58° erhöht, und zwar durch die Wärme, welche das Wasser bei seiner Abkühlung abgegeben hat. Diese Wärme beträgt 2°; zur Erwärmung um 58° braucht demnach 1^{kg} Quecksilber 2°, zur Erwärmung um 1° folglich $^1/_{29}$°; die sp. W. des Hg ist $^1/_{29}$.

5. Gesetz von Clausius (1850). Die specifische Wärme der Gase ist constant; für andere Körper ändert sich die specifische Wärme in geringem Grade mit der Dichte, der Temperatur, der chemischen Constitution und der allotropischen Modification, in hohem Maße dagegen mit dem Aggregatzustande; Kohlenstoff, Bor und Silicium zeigen innerhalb gewisser Temperaturgrenzen bedeutende Aenderungen mit der Temperatur (H. F. Weber 1875).

Ein bestimmtes Gewicht eines luftförmigen Körpers enthält immer, welches auch seine Dichte, seine Temp., seine Modification sein möge, dieselbe Anzahl von At.; die Erhöhung der Temp. dieses Gasgewichtes um 1° besteht demnach unter allen Umständen darin, immer derselben Anzahl von At. dieselbe Erhöhung der leb. Kft. zu ertheilen, wozu immer dieselbe leb. Kft. oder dieselbe Wärme nöthig ist. Die äußere Arbeit ist ebenfalls bei const. Drucke nahezu immer dieselbe, bei const. Vol. fast Null; die innere Arbeit der Mol. fällt bei den Luftarten fast weg, und die innere Arbeit der At. ist gering, bietet also in verschiedenen Zuständen eines und desselben Gases nur unmerkliche Verschiedenheiten dar; folglich ist die sp. W. eines und desselben Gases unter allen Umständen dieselbe. Clausius sprach diesen Satz, gestützt auf die mechanische Wärmetheorie, schon zu einer Zeit aus, wo man aus nicht ganz genauen Versuchen die entgegengesetzte Meinung gewonnen hatte; durch Veröffentlichung der genauen Versuchsresultate Regnaults erhielt der Satz seine Bestätigung, und gewann hierdurch die mechanische Wärmetheorie eine wesentliche Stütze. Für die übrigen Körper könnte der Satz nur ausgesprochen werden, wenn man sich dieselben in stark überhitzte Dämpfe verwandelt denkt, wo jeder Einfluß der Anziehung, jede Veränderlichkeit der inneren und äußeren

Arbeit wegfällt. Jedoch hat E. Wiedemann (1876) gefunden, daß die Constanz der sp. W. nur bei den zweiatomigen der von ihm untersuchten Gase und Dämpfe, für O, H, N und CO gilt, daß aber die dreiatomigen CO_2 u. N_2O eine allerdings unbedeutende Zunahme mit der Temp. zeigen, die bei dem vieratomigen NH_3 noch geringer ausfiel; auch Winkelmann hat damals aus der Wärmeleitungsfähigkeit der Gase ähnliche Schlüsse gezogen. In seinen späteren Untersuchungen (1877) fand E. W., daß für vielatomige Dämpfe die Aenderung stärker sei und zwar um so stärker, je mehr At. in den Mol. sind; hierin liegt eine Bestätigung der Vermuthung, daß die Aenderung von einer Arbeit der At., von einer beginnenden Dissociation der Mol. herrühre. Valerius (1879) und Quesneville (1880) kommen Jeder für sich zu dem Schlusse, daß diese Zunahme bei steigender Temp. geringer werde und endlich ganz verschwinde, so daß bei hinreichend hoher Temp. die Constanz der sp. W. eintrete, analog mit H. F. Webers Angaben über C, B und Si.

Wird in festen oder flüssigen Körpern die Disgregation vermehrt, wird also die Dichte kleiner, die Temp. erhöht, eine chemische Verbindung zersetzt, so werden die At. und Mol. weiter von einander entfernt und die Anz. wird kleiner. Zugeführte Wärme kann jetzt die Anziehung leichter überwinden und kann eine größere innere und äußere Arbeit leisten, worauf auch das Wachsen des Ausd.-Coëf. mit der Temp. deutet; folglich wird ein größerer Theil der zugeführten Wärme für Arbeit verbraucht; die Summe dieser größeren Arbeitswärme und der gleich bleibenden Atom- oder Molekularwärme ergibt also für einen Körper von vergrößerter Disgregation eine größere sp. W.; besonders viel größer wird die Arbeitswärme, wenn ein fester Körper in den flüssigen Zustand übergegangen ist; folglich ist die sp. W. eines Körpers im flüssigen Zustande größer als im festen; Wasser hat eine größere sp. W. als Eis. Im gasförmigen Zustande ist die innere Arbeit theilweise nahezu = 0; folglich muß die sp. W. hier wieder kleiner werden; sie wird sogar viel kleiner, wenn der Körper gasförmige El. enthält, weil deren Atomwärme in noch unerklärter Weise viel kleiner als die der festen El. ist. Clausius sprach (1850) schon aus, daß die sp. W. des Wasserdampfes viel kleiner als der von Delaroche und Bérard angegebene Werth 0,847 sein müsse, und erhielt auch hier eine Bestätigung durch Regnaults genauere Zahl = 0,475.

Die Veränderung mit dem Aggregatzustande ist nach diesen Zahlen eine sehr bedeutende, während die übrigen Veränderungen mit der Dichte, mit der Temp. u. s. w. gering sind. Auffällig ist dem gegenüber die ungemein große Veränderung von C, B u. Si mit der Temp., welche von H. F. Weber entdeckt worden ist, und das Aufhören dieser starken Veränderlichkeit bei den Endtemp. 600 und 200°, oberhalb welcher die 3 El. nur die kleine Veränderlichkeit aller übrigen Körper mit der Temp. zeigen; hierdurch wird der Gedanke nahe gelegt, daß auch die anderen El. eine solche, vielleicht niedrig gelegene Endtemp. haben könnten, unterhalb derer die sp. W. sich stark, oberhalb derer sie sich aber schwach mit der Temp. ändern dürfte. Wie schon Wöstyn (1848) den Satz ausgesprochen hatte, daß die sp. W. in den Verbindungen dieselbe sei wie in den El., und Kopp (1863) nachgewiesen hatte, daß die festen El. sowohl ihre normale, wie ihre abnorme Atomwärme in ihre festen Verbindungen mit hinübernehmen, so hat H. F. Weber (1875) gefunden, daß die abnormen El. sogar das Wachsen ihrer sp. W. mit der Temp. auch in ihren Verbindungen unverkennbar wahrnehmen lassen. Eine seltsame Ausnahme bildet das Quecksilber nach Winkelmann (1876), da dessen sp. W. bei wachsender Temp. nicht zunimmt, sondern constant bleibt, ja vielleicht gar abnimmt.

Auch die Veränderlichkeit mit der allotropischen Modification, die zuerst von Regnault (1841) für C u. S gefunden wurde, ist durch die mechanische Wärmetheorie erklärlich, da in verschiedenen Modificationen die Mol. gegen einander oder die At. in den Mol. gegen einander eine verschiedene Lage haben müssen, oder auch beide Fälle vereinigt stattfinden können, wodurch jedenfalls die innere Arbeit, wenn auch nur sehr wenig verändert wird. Wirklich sind auch die Veränderungen so klein, daß Kopp (1865) glaubte, sie lägen in den Grenzen der Beobachtungsfehler; hiergegen sprechen neuere Beobachtungen von Bettendorff und Wüllner (1868), welche erhebliche Abweichungen für die Modificationen von Arsen und Selen nachweisen, und die Forschungen von H. F. Weber (1875), nach welchen, allerdings der Meinung von Regnault entgegen, alle undurchsichtigen Modificationen des Kohlenstoffs (Graphit, dichte und poröse amorphe Kohle) dieselbe sp. W., jedoch eine erheblich größere sp. W. als die durchsichtige Modification, der Diamant haben, wonach weiter die sp. W. beider Mod. mit der Temp. steigen, sich aber immer mehr einander nähern und endlich bei der Endtemp., wo ihr optischer Unterschied in der gleichen Gluth zu Ende ist, zusammenfallen.

6. Gesetz von Laplace (1817). Das Verhältniß der specifischen Wärme der Gase bei constantem Drucke zu der bei constantem Volumen ist constant = 1,41, vorausgesetzt, daß der constante Druck der einer Atmosphäre ist.

Beweis. Bei const. Vol. ist nur Wärme nöthig zur Erwärmung, bei const. Druck

über auch zur Ueberwindung dieses Druckes während der ganzen Ausdehnung; folglich muß die sp. W. bei const. Drucke um den Wärmebetrag dieser äußeren Arbeit größer sein als die sp. W. ei const. Vol.; da nun wegen der fast gleichen Ausdehnung aller Gase diese äußere Arbeit immer dieselbe ist, so muß bei allen Gasen und bei allen Temp. für Erwärmung bei const. Drucke ein fast gleicher Wärmebetrag mehr vorhanden sein als bei const. Vol. — Die äußere Arbeit beträgt aber bei der Erwärmung von 1^{cbm} Gas um $1^{\circ} = 10\,328 \,.\, 0{,}003\,665 = 37{,}85^{mk}$, wofür $37{,}85 / 424 = 0{,}0893^{\circ}$ nöthig sind. Nun ist nach Regnault die sp. W. von 1^{kg} Luft bei const. Drucke $= 0{,}23\,741$; daher beträgt die sp. W. von 1^{cbm} oder $1{,}293^{kg}$ $0{,}23\,741 \,.\, 1{,}293 = 0{,}30\,697$. Da von dieser Wärme $0{,}0893^{\circ}$ für äußere Arbeit verbraucht werden, so bleiben für Erwärmung $0{,}30\,697 - 0{,}0893 = 0{,}21\,767^{\circ}$. Diese Zahl gilt für 1^{cbm}; für 1^{kg} ist demnach die Wärmecapacität $= 0{,}21\,767 / 1{,}293 = 0{,}1683$. Diese für die ausschließliche Erwärmung von 1^{kg} Luft nöthige Wärme ist aber nichts Anderes als die sp. W. der Luft bei const. Vol., folglich ist das Verhältniß der sp. W. bei constantem Drucke zu der sp. W. bei constantem Volumen $= 0{,}23\,741 / 0{,}1683 = 1{,}41$.

Die angeführten Gesetze ergaben sich höchst einfach aus der mechanischen Wärmetheorie. In der Geschichte der Wissenschaft folgten aber diese Ergebnisse nur aus sehr zahlreichen, die höchste Genauigkeit anstrebenden und höchst anstrengenden experimentellen Untersuchungen, welche die beste Lebenskraft zahlreicher Forscher in Anspruch nahmen und meist sehr complicirte und kostspielige Apparate und die feinsten und durchdachtesten Methoden erforderlich machten. Nach der früheren Wärmetheorie waren die Ergebnisse meistens räthselhaft; die mechanische Wärmetheorie hat nicht nur diese Räthsel gelöst, sondern auch manche Resultate berichtigt und geklärt, ja sogar neue vorausgesagt; darum ist die Lehre von der sp. W. eine wesentliche Stütze dieser Theorie. Wie die neueren, von dem Lichte der Theorie gehobenen Forschungen neue Räthsel aufdeckten und eine tiefere Einsicht in das Wesen des Stoffes anahnen, ist schon erwähnt worden. Um so nothwendiger ist es daher auch, die experimentellen Methoden und einige Zahlenresultate kennen zu lernen.

Methoden zur Bestimmung der specifischen Wärme fester und flüssiger Körper. 429 a. Die Mischungsmethode oder das Wassercalorimeter (Neumann 1831, Regnault 1840). Man erwärmt den zu prüfenden Körper m bis zu einer gewissen Temperatur t und bringt ihn dann in eine bestimmte Wassermenge m′ von der Temperatur t′; er theilt alsdann dem Wasser soviel Wärme mit, bis die Mischung eine gemeinsame Temperatur T besitzt, aus welcher man die spec. W. c des Körpers berechnen kann. Denn der Körper enthält, vom Gefrierpunkte an gerechnet, vor der Mischung die Wärme mct, die Flüssigkeit, deren sp. W. $= c'$ sein möge, ebenfalls vor der Mischung die Wärme $m'c't'$, beide also zusammen $m\,c\,t + m'c't'$. Nach der Mischung, wo die gemeinsame Temperatur T stattfindet, ist die betreffende Wärme $= (mc + m'c')\,T$. Ist durch diese Mischung keine Wärme verloren, so besteht die Gleichung $mct + m'c't' = (mc + m'c')\,T$, woraus man findet $c = m'c'\,(T - t') / (t - T)$.

Ist die Calorimeterflüssigkeit Wasser, so ist $c' = 1$; für Körper, die im Wasser löslich sind, oder von denen nur geringe Mengen zu Gebote stehen, wendet man als Calorimeterflüssigkeit Terpentinöl an, weil dessen sp. W. sehr gering ist, und demnach schon eine geringe Wärme zu meßbarer Temperaturerhöhung ausreicht. Die Schwierigkeiten dieser Methoden liegen darin, die Temp. genau zu messen, die Temp. des Körpers während des Ueberganges in die Calorimeterflüssigkeit const. zu erhalten und die unvermeidlichen Wärmeverluste während des Versuches genau zu finden. Die hierdurch entstehenden Fehler sind verhältnißmäßig um so kleiner, je größer die Körpermasse und die Menge der Calorimeterflüssigkeit ist und umgekehrt; daher ist die Methode nur für Körper tauglich, von denen größere Massen zu Gebote stehen. — Regnault brachte den Körper in einem an feinen Fäden hängenden Körbchen in eine weite Weißblechröhre, welche von einem zweiten und diese von einem dritten Blechgefäße umgeben war und durch deren Deckel ein Thermometer ging. In den inneren Ringraum wurde Dampf geleitet und dadurch der Körper auf eine am Thermometer ablesbare Temp. erhitzt; dann wurde das Körbchen rasch in das unter dem Gefäße stehende Calorimeter herabgelassen und dieses auf einem Schlitten weggezogen, um die Mischtemp. zu beobachten. Um die Wärmeverluste an die Umgebung möglichst zu compensiren, ließ man nach Rumford vor dem Versuche die Calorimeterflüssigkeit soweit unter die Lufttemp. abkühlen, als sie nach dem Versuche über dieselbe erwärmt ist. Flüssigkeiten füllte Regnault in dünne Röhrchen, die er in das Körbchen legte. Kopp (1864) entfernte das Calorimeter weiter von dem Erwärmungsapparat, um dessen Strahlung abzuschwächen, erhitzte den festen Körper in einem kleinen Gläschen von Wasser bedeckt in einem Quecksilberbade und schüttete denselben rasch in das Calorimeter; nach dieser kurzen Methode untersuchten er und später

(1868) Wüllner die allotropen Modificationen, sowie Schüller (1869) zahlreiche Salzlösungen. Pfaundler (1868) umging die hierbei möglichen Fehler durch Erwärmung gleicher Mengen der zu untersuchenden Flüssigkeit und des Wassers durch je eine Drahtspirale von gleichem Widerstande, welche von einem und demselben elektr. Strome durchflossen wird. Thomsen (1870) erhitzte gleiche Mengen verschiedener Flüssigkeiten durch Verbrennung eines und desselben Wasserstoffvol. in dem Calorimeter und berechnete die sp. W. aus den verschiedenen Temperaturerhöhungen, welche dieselben durch eine und dieselbe Wärmemenge erfahren. (Richmanns Regel, S. Aufg. 695.)

b. Die Methode des Eisschmelzens oder das Eiscalorimeter (Lavoisier und Laplace 1780, Bunsen 1870). Man erwärmt den zu prüfenden Körper m zur Temperatur t und bringt denselben in Eis von 0°; durch seine allmälige Abkühlung bis auf 0° bringt er eine gewisse Eismenge zum Schmelzen, deren Gewicht p aus dem Gewichte des abfließenden Wassers erkannt wird. Dieses Eis bedarf zum Schmelzen einer Wärme von 80p°; die von dem Körper, dessen sp. W. = c sein möge, abgegebene Wärme mct muß der Schmelzwärme gleich sein; hieraus erfolgt für die sp. W. der Werth $c = 80p/mt$.

Lavoisier und Laplace benutzten ein doppelwandiges Blechgefäß, dessen innerer und äußerer Raum durch Hähne mit der Luft communicirten, in den Innenraum wurde in einem Drahtkörbchen der Körper in Eisklümpchen gebettet, der Außenraum ebenfalls mit Eis gefüllt und das Ganze mit einem hohlen eisgefüllten Deckel verschlossen. Obwohl diese Methode sehr einfach ist, so ist sie wegen der hohen Schmelzwärme des Eises nur für große Körpermengen anwendbar; auch sind Fehlerquellen dadurch vorhanden, daß das Wasser dem Eise adhärirt, und daß äußere Wärme dennoch eindringen kann. Bunsens (1870) neues Eiscalorimeter ist für kleinere Körpermengen geeignet. Dasselbe besteht aus einem U-förmig gebogenen Glasrohre, dessen einer Schenkel in einen weiten Glascyl. ausmündet, in dessen Deckel ein nach oben offenes Proberöhrchen eingeschmolzen ist; der das Proberöhrchen umgebende, obere Cylinderraum ist mit Wasser ausgefüllt, während der untere Theil desselben, sowie der andere längere Schenkel mit Quecks. gefüllt sind. In die offene Mündung dieses Schenkels wird ein Stöpsel mit einer langen Röhre eingepreßt, in welche hierbei das Quecks. hinaufsteigt. Nun wird das Wasser im Cyl. zum Gefrieren gebracht, indem man mittels zweier Röhren öfters sehr kalten Alkohol durch das Proberöhrchen steigen läßt. Dann wird auch in das Proberöhrchen Wasser und in dieses der zu untersuchende Körper gebracht; die Wärme desselben schmilzt einen Theil des umliegenden Eises, dessen Menge aus dem Fallen des Quecks. in der engen Stöpselröhre erkannt wird, und aus welcher dann die sp. W. leicht zu berechnen ist. So fand Bunsen die sp. W. von Ca, In und Ruthenium.

430 c. Die Methode des Erkaltens. (Tobias Mayer 1796, Regnault 1840). Von zwei warmen Körpern von gleichem Gewicht, gleicher Temperatur und gleichem Ausstrahlungsvermögen, die in zwei gleich kalte, luftleere Räume gebracht werden, muß derjenige durch Ausstrahlung am schnellsten erkalten, der die kleinste sp. W. hat. Hierauf beruht die Methode des Erkaltens. Der eine Körper m erkalte in der Zeit s um t°, so verliert er, wenn seine sp. W. = c ist, in 1 Secunde die Wärme mct/s; der andere Körper m′ mit der sp. W. c′ kühle sich in der Zeit s′ um t° ab, so verliert er in 1 Sec. die Wärme von $m'c't/s'$. Da unter obigen Voraussetzungen die in 1 Sec. ausgestrahlten Wärmemengen einander gleich sein müssen, so ist $mct/s = m'c't/s'$, woraus $c' = mcs'/m's$.

Dulong und Petit benutzten einen bleiernen, inwendig rußgeschwärzten Behälter, durch dessen Deckel luftdicht ein Thermometer ging, das mittels seiner Röhre ein Gefäß von Silberblech trug. In dieses wurde zu der Thermometerkugel der betreffende Körper gebracht, und das Ganze in ein Wasserbad von bestimmter Temp. gestellt. Dann wurde die Zeit beobachtet, welche zu einem Sinken des Thermometers um 5° nothwendig war. Wurde derselbe Versuch mit Wasser gemacht, so ergab die Anwendung obiger Rechnung auf diese zwei Versuche die verlangte sp. W. — Diese Methode setzt voraus, daß die Erkaltung durch die ganze Körpermasse gleichmäßig geschehe, und daß alle Stoffe ihre Wärme in gleicher Weise an das Silberblech abgeben; am geeignetsten ist sie noch für flüssige Körper.

431 **Versuchsresultate über die specifische Wärme fester und flüssiger Körper.** Das Wasser hat mit Ausnahme des Wasserstoffs, dessen sp. W. = 3,4 ist, die größte sp. W.; die aller anderen Stoffe ist kleiner als 1. So ist sie für Alkohol = 0,6, Aether = 0,5, Terpentinöl = 0,4, Schwefelkohlenstoff = 0,2, Brom 0,1, Quecksilber 0,033, Lithium 0,9, Zucker u. a. organ. Verbindungen 0,3, Magnesium 0,25, Schwefel 0,2, Gläser, gewöhn-

iche Steine, viele Salze, Bodengrund = 0,2, Eisen 0,11, Oxyde, Schwefel- und Chlor-
netalle 0,1, Zink, Kupfer, Messing, 0,09, Zinn und Silber 0,06, manche Legirungen 0,04,
Gold und Platin 0,03. In diesen Zahlen liegt außer der Bestätigung des Wilcke'schen
Gesetzes noch die Thatsache, daß die sp. W. flüssiger Körper durchschnittlich größer ist
ls die fester Körper; deutlicher tritt dies gemäß Gesetz 5. in den beiden Aggregatzuständen
ines und desselben Körpers hervor; die sp. W. des Eises ist 0,5, des Wassers 1; die von
estem Salpeter 0,23, von flüssigem 0,33; sp. W. von festem Schwefel 0,18, von flüssigem
),23; von festem Phosphor 0,19, von flüssigem 0,21; von festem Zinn 0,056, von flüssigem
),063; von festem Blei 0,03, von flüssigem 0,4. Aehnlich zeigen sich die Unterschiede in
er Dichte: Diamant hat von — 50 bis 250° die sp. W. 0,06 bis 0,3, Graphit dagegen
),13 bis 0,4; durch Hämmern geht die sp. W. des Kupfers von 0,095 auf 0,093 herab.
Zahlreich sind die Versuche über die Wirkungen der Temperatur außer den öfter ange-
ührten von Weber. Schon Dulong und Petit fanden für die mittlere sp. W. des Eisens
wischen 0 und 100° den Werth 0,1098, dagegen zwischen 0 und 290° den Werth 0,1218;
ie sp. W. des Wassers steigert sich nach Versuchen von Bosscha (1874) bei der Erwärmung
on 0 bis 200° um 1/50; doch sind die Angaben sehr verschieden. Pfaundler gibt (1866)
ür die sp. W. des Wassers die Fl. 1 + 0,000384t, Wüllner (1880) dagegen 1 + 0,000425t,
vas noch mehr ausmacht. Bettendorf und Wüllner fanden für allotropische Modi-
icationen folgende Zahlen: krystallisirtes Arsen 0,083, amorphes 0,0758; krystallinisches
Selen 0,084, amorphes 0,0953. Die Kleinheit aller dieser Unterschiede spricht ebenfalls für
en Satz, daß die sp. W. eines Elements sich in den Verbindungen erhält, was durch die
veite Geltung des Neumann'schen Gesetzes bestätigt wird. Hiernach läßt sich die sp. W.
iner Verbindung annähernd aus den sp. W. der Bestandtheile berechnen: man addirt
ie sp. W. der Atomgewichte der Bestandtheile und dividirt die Summe durch das Molekular-
ewicht der Verbindung. So berechnet sich die spec. W. von Schwefelkupfer Cu_2S =
2 . 0,095 . 64 + 0,18 . 32) / (2 . 64 + 32) = 0,112, während Regnaults Versuche 0,120
rgaben. Umgekehrt kann man aus der sp. W. einer Verbindung die sp. W. eines Be-
tandtheils oder auch das Atomgewicht desselben berechnen, falls die übrigen Größen
egeben sind.

Berechnet man die sp. W. chemischer Verbindungen aus den sp. W. ihrer Bestand-
heile; wie eben ein Beispiel durchgeführt wurde, so erhält mau meist die sp. W. größer als
urch den Versuch; so ergibt eine Rechnung für Schwefelzink 0,131, während Regnaults
Versuche 0,123 ergeben; dies entspricht der Regel, daß eine Verdichtnng die sp. W. ver-
ingert, indem mit der chemischen Vereinigung eine Verminderung der Disgregation, eine
Verdichtung verbunden ist. Man hat sich hieraus den Schluß erlaubt, daß ein Gleichbleiben
er sp. W. bei einem Zusammentreffen verschiedener Stoffe darauf hindeute, daß dieselben
icht eine chemische Verbindung, sondern nur ein mechanisches Gemenge bilden. Diesen
Schluß unterstützte Regnaults Untersuchung der sp. W. von Legirungen, welche sich hierbei
leich dem Mittel aus den sp. W. der Gemengtheile, ja meist noch etwas größer als diese
rgaben. In derselben Richtung untersuchte Schüller (1869) die Salzlösungen, fand aber
ie beobachtete sp. W. meist kleiner als das berechnete Mittel, und zwar zeigte sich bei ver-
chiedenen Concentrationen der Lösungen das Verhältniß zwischen der Beobachtung und dem
Mittel bald constant z. B. bei Kochsalz, bald veränderlich, und in dem letzten Falle mit
teigendem Procentgehalte bald zunehmend und selbst die Einheit übersteigend, bald abneh-
mend. Noch umfassendere Untersuchungen führten Thomsen (1870) zu dem allgemeinen
Schlusse, daß beim Mischen von Wasser mit einer wässerigen Lösung die sp. W. stets ge-
inger werde. Marignac (1870) warf dagegen ein, daß bei der Mischung von Alkohol mit
Wasser die sp. W. nicht blos das Mittel, sondern sogar die sp. W. des Wassers übersteige,
owie daß Zucker- und eine Ammoniaklösung eine sp. W. gleich dem Mittel aus denjenigen ihrer
Bestandtheile hätten; indessen können diese wenigen Ausnahmen jenen Schluß Thomsens
icht beeinträchtigen, aus dem man sodann folgern dürfte, daß die Lösungen eine Art chemi-
cher Constitution hätten, die sich mit der Concentration ändere. — Thomsen untersuchte
uch die Molekularwärmen der Lösungen und fand entsprechend dem Thomsen-Schüller'schen
Gesetze, daß die Molekularwärme einer Lösung immer geringer ist als die Summe der Mo-
ekularwärmen der sie bildenden Flüssigkeiten, ja daß in manchen Fällen z. B. bei Schwefel-
äure und Salpetersäure die Molekularwärme der geringeren Concentrationsgrade mit der
es Wassers übereinstimmt und bei der Salzsäure sogar unter dieselbe herabgeht, so daß
ine Lösung mit 17% HCl zehn % weniger Wärme bedarf als das in ihr enthaltene Wasser.
Auch fand Hammerl (1879), daß für eine Lösung, die in 100g 32g HCl enthält, die sp. W.
,63 ist und mit abnehmenden Gehalte an HCl zunimmt, z. B. bei 5g HCl auf 0,93 ge-
tiegen ist; analog ist nach Hammerl (1880) die sp. W. von Kalilauge, die in 100g Lösung
3g Kali enthält = 0,7; wenn sie aber nur 6g enthält, so ist die sp. W. 0,9.

Die Bestimmungen der specifischen Wärme der Gase (Delaroche und Bérard 432
1813). a. Bei constantem Drucke. Eine bestimmte Menge des Gases wird

zu einer genau bestimmten Temperatur erwärmt und mittels eines Schlangenrohres durch ein Wassercalorimeter geleitet. Die Menge des Wassers, sowie seine Temperatur vor und nach dem Versuche werden genau gemessen, und aus diesen Größen ist dann die Unbekannte zu bestimmen. Die erste genauere Verwirklichung dieser Idee geschah von Delaroche und Bérard; noch größere Genauigkeit suchte in späteren Jahren Regnault zu erzielen.

Den const. Druck brachten Delaroche und Bérard durch eine Mariotte'sche Flasche hervor, aus welcher Wasser in eine unter ihr stehende 3fach tubulirte Wulf'sche Flasche fiel; die in derselben befindliche Luft strömte durch eine Röhre in einen Glasballon, in welchem eine mit dem zu untersuchenden Gase gefüllte Blase an der Mündung einer anderen Röhre hing. Durch den immer gleichbleibenden Druck der in den Ballon strömenden Luft wurde das Gas aus der Blase in die Röhre getrieben und auf dem Verlaufe derselben durch Dampf, der in ein die Röhre umgebendes, längeres Mantelrohr einströmte, erwärmt; nach dem Austritte aus diesem Mantelrohre ging das Gas an einem Therm. vorbei, wodurch man die Temp. desselben erfuhr, und dann durch das Calorimeter. Aus diesem wurde es durch eine zweite, ganz gleiche Zusammenstellung von Apparaten in eine 2te Blase eingesaugt, und dann durch Verstellung von Hähnen abermals durch den Doppelapparat zurückgetrieben, was man beliebig oft wiederholen konnte. Das Vol. des Gases konnte aus dem Sinken des Wassers in der Mariotte'schen Flasche entnommen und hieraus das Gewicht desselben berechnet werden. Ungenauigkeiten konnten hier entstehen dadurch, daß das Therm. der Gase Wärme durch Strahlung nach außen verlor, daß das Calorimeter Wärme vom Heizapparate trotz noch so großer Entf. durch Leitung empfing, daß die Gase in der Blase durch die Feuchtigkeit der treibenden Luft ebenfalls feucht und durch Diffusion sogar unrein werden mußten. Regnault fand daher bei seinen Versuchen vielfach andere Resultate als Delaroche und Bérard. Für Luft ergab sich $c = 0,23741$, für O 0,21751, für H 3,409, für N 0,2438, für Chlor 0,21099. Hieraus ergeben sich die Atomwärmen für $O = 3,4$, für $H = 3,4$, für $N = 3,4$, für $Cl = 4,6$, also eine fast absolute Gleichheit für die 3 permanenten, elementaren Gase, aber Ungleichheit sowohl mit den festen El. als auch mit den übrigen Gasen. Leicht ist auch aus den angegebenen Zahlen durch Rechnung zu finden, daß die sp. W. gleicher Vol. der genannten drei Gase dieselbe und zwar $= 0,24$ ist, und daß die sp. Volumw. der anderen Gase um so mehr hiervon abweicht und um so größer wird, je coercibler dieselben sind. Eilhard Wiedemann fand (1876) für CO_2 $c = 0,2058$, für CO [illegible], für Aethylen C_2H_4 0,4293, für Stickoxydul N_2O 0,2241, für Ammoniak NH_3 0,5356 im Mittel; für $0^0 = 0,5009$, für $100^0 = 0,5387$, für $200^0 = 0,5629$, woraus die Zunahme mit der Temp. zu ersehen; 1877 fand er für Dämpfe von Chloroform 0,1567, von Benzin 0,3946, von Aether zwischen 111 u. 25^0 $c = 0,4280$, dagegen zwischen 188 u. 27^0 $c =$ [illegible]. Merkwürdig ist die Beobachtung von W., daß die Aenderungen der sp. W. der Dämpfe mit der Temp. häufig denen der entsprechenden Flüssigkeiten gleich oder wenigstens von derselben Größenordnung sind.

433 b. Bei constantem Volumen. Die sp. W. bei constantem Drucke übertrifft die sp. W. bei constantem Volumen um den Betrag der Ausdehnungswärme, die zur Ueberwindung des äußeren Luftdruckes p bei der Ausdehnung des Luftvolumens v_0 von 0^0 auf 1^0 nöthig ist; diese Wärmemenge ist $= pv_0\alpha A$ Cal; ist demnach die sp. W. bei constantem Drucke $= c$, die bei constantem Volumen $= c'$, so ist $c = c' + pv_0\alpha A$; hieraus folgt für das Verhältniß der zwei spec. W. $c : c' = 1 + pv_0\alpha A / c'$. Der zweite Summand in diesem Ausdrucke ist aber gleich der Temperaturerhöhung, welche durch eine Zusammendrückung $v_0\alpha$ mittels des Druckes p hervorgebracht wird; denn ist $v_0\alpha$ die Zusammendrückung des Volumens v_0 durch den Druck p, so ist die hierbei geleistete Arbeit $= pv_0\alpha$, also die entstandene Wärme $= pv_0\alpha A$. Unter dem constanten Drucke p erwärmt sich aber durch die Wärme c' die Luft um 1^0, daher durch die Wärme $pv_0\alpha A$ um $x = pv_0\alpha A / c'$; bestimmt man daher diese Temperaturerhöhung x, so kennt man auch das vielbesprochene und wichtige Verhältniß $c : c'$ oder $k = 1 + x = 1,41$.

Jene Temperaturerhöhung findet man durch einen Versuch von Clément und Desormes (1819). Ein großer Glasballon ist durch einen großen Hahn mit einer Luftpumpe oder mit der Luft in oder außer Verbindung zu setzen und steht außerdem mit einem empfindlichen Wasser-Manometer in Communication. Durch theilweise Entleerung des Ballons steigt das letztere auf h', so daß die innere Spannung nur noch $= p - h'$. Läßt man nun neue Luft einströmen, so wird das Vol. der darin gebliebenen Luft durch Compression um

[illegible] Bruchtheil δ kleiner, beträgt also nur noch $1 - \delta$ des früheren Vol.; würde bei dieser [illegible]pression keine Wärme entstehen, so würde nach Mariotte die Spannung der Luft sein [illegible] $- h') / (1 - \delta)$. Wird aber die Temp. t um x^0 gesteigert, so steigt nach Gaylussac [illegible] Spannung auf $[1 + \alpha (t + x)] / (1 + \alpha t)$; da sie indeß nach der Verbindung mit der [illegible]eren Luft gleich der Spannung p derselben sein muß, so entsteht die Gl. $p = (p - h') [illegible] + \alpha (t + x)] / (1 - \delta) (1 + \alpha t)$. Läßt man nun den Ballon abkühlen, bis $x = 0$, so [illegible] die Spannung wieder, das Manometer hat nur noch die Steigung h, die Spannung [illegible] also $p - h$; folglich ist nach Mariotte $(p - h') / (1 - \delta) = p - h$. Die 2 Gl. ermöglichen die Berechnung von δ, der Compression, und von x, der hierdurch bewirkten Temperatursteigerung; es ergibt sich $\delta = (h' - h) / (p - h)$ und $x = (1 + \alpha t) h / \alpha (p - h)$. Ist nun aber die Zusammendrückung $\delta = v_0 \alpha$ und hervorgerufen durch den Luftdruck p, so ist x nach dem Eingange dieses Beweises gleich dem zweiten Summanden in dem Werthe für $c : c'$; die zweite Bedingung ist hier erfüllt, und die erste ist leicht zu erfüllen, indem wir das Vol. v_0 bei 0^0 durch das hier betrachtete Vol. 1 bei t^0 ausdrücken; dasselbe ist $v_0 = 1 / (1 + \alpha t)$; daher ist $\delta = \alpha / (1 + \alpha t)$. Setzen wir die beiden Werthe von δ einander gleich, so ist $\alpha / (1 + \alpha t) = (h' - h) / (p - h)$ und umgekehrt $(1 + \alpha t) / \alpha = (p - h) / (h' - h)$. Wenn wir nun den Werth für $(1 + \alpha t) / \alpha$ in den für x substituiren, so ergibt sich die gesuchte Temperaturerhöhung $x = (p - h) h / (h' - h) (p - h) = h / (h' - h)$. Dieselbe kann daher aus den beiden Manometerständen leicht berechnet werden, woraus sich der Werth von $k = 1 + h / (h' - h)$ ergibt. Clément und Desormes fanden $k = 1{,}357$, Külp bei einem etwas veränderten Versuche 1,425, während unsere Berechnung aus dem mech. Aeq. der Wärme 1,41 ergab. Dieser Werth verdient am meisten Vertrauen, weil er sich aus den genauesten Beobachtungen der Schallgeschw. berechnen läßt.

434 Die Geschwindigkeit und die Schwingungszahl des Schalles vergrößern sich um den Factor $\sqrt{k}$, durch die in der Verdichtungswelle erzeugte und in der Verdünnungswelle verzehrte Wärme (Laplace 1817).

Beweis. Die Schallgeschw. ist nach der bekannten Fl. (29) $\sqrt{(e / d)}$, worin d, die Masse der Volumeinheit, $= s$, dem Gewichte der Volumeinheit dividirt durch g, die Acceleration der Schwere, also $= s / g$, und worin e gleich dem Luftdrucke p; demnach ist die Geschw. $\sqrt{(pg / s)}$ oder auch $= \sqrt{[g / (s / p)]}$. Hierin bedeuten s und p die Dichte und den Druck bei t^0; sind s_0 und p_0 dieselben Größen bei 0^0, also $p_0 =$ dem Gewichte von $0{,}76^m$ Quecksilber, so ist $p : s (1 + \alpha t) = p_0 : s_0$. Wächst nun p, der Luftdruck, um s, so wachse t um Δt und s um Δs, wobei natürlich die Proportion $s : p = \Delta s : s$ stattfindet; hierdurch nimmt die letzte Gl. folgende Gestalt an $s : [\Delta s (1 + \alpha t) + \alpha s \Delta t] = p_0 : s_0$, woraus $1 = (p_0 / s_0) (1 + \alpha t) [(\Delta s / s + \alpha t / (1 + \alpha t)]$. Durch die eben vorausgesetzte Druckzunahme findet die Compression $\Delta s : s$ statt mit der Temperaturzunahme Δt; in dem Versuche von Clément und Desormes war die Compression $= \alpha / (1 + \alpha t)$ und die entsprechende Temperaturzunahme $= h / (h' - h)$; daraus folgt die Proportion $(\Delta s / s) : (\alpha / (1 + \alpha t)) = \Delta t : (h / (h' - h))$, woraus $\alpha \Delta t : (1 + \alpha t) = (\Delta s / s) h : (h' - h)$. Wenn wir diesen Werth in den obigen Ausdruck für 1 substituiren und zugleich statt $\Delta s / s$ den gleichen Bruch s / p setzen, so ergibt sich $1 = (p_0 / s^0) (1 + \alpha t) [(s / p) + (s / p) h / (h' - h)] = (p_0 / s_0) (1 + \alpha t) [1 + h / (h' - h)] . (s / p)$. Nun ist der eckige Klammerausdruck direct $= k$ nach dem vorigen Beweise; folglich ist jetzt $1 = (p_0 / s_0) (1 + \alpha t) k (s / p)$, woraus folgt $(s / p) = (s_0 / p_0) / (1 + \alpha t) k$. Wird dieser Werth von s / p in die obige zweite Fl. für die Schallgeschw. eingesetzt, so ergibt sich dieselbe $= \sqrt{[g (1 + \alpha t) k / (s_0 / p_0)]}$. Hierin ist p_0 der Luftdruck = dem Barometerstande h mal dem sp. G. s' des Quecksilbers; durch Einsetzung dieser Werthe ergibt sich die Schallgeschw. $= \sqrt{[(1{,}42\, hs' g : s) (1 + \alpha t)]}$, was ganz mit Fl. (40) übereinstimmt, vorausgesetzt daß $k = 1{,}42$ angenommen wird. Nimmt man aber umgekehrt den Factor k als unbekannt an und berechnet ihn aus der Schallgeschw. in der Luft, 332,28, so findet man für Luft $k = 1{,}41$. Wegen der Wichtigkeit dieser Größe wurde sie noch auf andere Arten sowohl für Luft als auch für andere Gase und Dämpfe bestimmt. Clausius (1850) gibt nämlich für das Verhältniß der Energie der fortschreitenden Bewegung der Gasmol. zu ihrer Gesammtenergie den Ausdruck $\frac{3}{2} (k - 1)$. Nach manchen chem. und phys. Thatsachen ist die oft erwähnte Vermuthung entstanden, daß Quecksilber in seine At. aufgelöst sei, daß also die Gesammtenergie gleich der fortschreitenden, daher obiger Ausdruck $= 1$ sein müsse; dann wäre aber k für Quecksilbergas $= 1^2/_3 = 1{,}666$. — Kundt und Warburg untersuchten nun (1876) das k des Quecksilbergases, indem sie nach der Methode der Kundt'schen Staubfiguren die Geschw. des Schalles in jenem Dampfe bestimmten und daraus durch Anwendung von Fl. 40 das k berechneten; es ergab sich wirklich $1^2/_3$, worin eine neue Bestätigung von Clausius' Theorie liegt. Durch dieses Eingreifen in die Theorie erhält das k in der mod. Ph. eine besondere Bedeutung; es kann entscheiden, ob in den Gasen mit 2atomigen Mol. jenes Energieverhältniß überall dasselbe ist. Regnault hatte schon (1862) für O_2, N_2, H_2, CO, NO, HCl das k bestimmt und fast überall 1,40 ge-

funden; nach einer veränderten und genaueren Methode und einer anderen Fl. hatten [illegible] (1873) und andere Physiker für diese Gase zwar nahe liegende, jedoch ziemlich verschiedene Werthe gefunden, für CO_2 sogar nur 1,30. Nun hat K. Strecker (1881) die Gase Cl_2, Br_2 und J_2 nach der Kundt'schen Methode untersucht, wobei sich für Cl_2 1,32, für Br_2 1,29 und für J_2 ebenfalls 1,29 ergab. Demnach ist jenes Energieverhältniß nicht für alle zweiatomigen Gase dasselbe; die Uebereinstimmung von k für einzelne Gruppen mag aber einmal zu Aufschlüssen über die Wechselwirkung der At. in den Mol. führen. So ergaben die Versuche Wiedemanns (1879), daß jenes Energieverhältniß, das bei 2atomigen Gasen meist = $^3/_5$ ist, bei 3atomigen meist kleiner als $^1/_2$ und bei dem 15atomigen Aether nur $^1/_5$ ist, also mit steigender Atomzahl, der Theorie entsprechend, abnimmt. Slouginoff will (188[illegible]) gefunden haben, daß für Gase das Prod. der sp. W. mit dem Moleculargewicht der Gase [illegible] umgekehrt proportional sei und daß das Product α n T k für alle Gase constant sei; n bedeutet die Zahl der At., die Bedeutung der übrigen Größen ist bekannt. Wiebe, der überhaupt den Zusammenhang zwischen Atomgewicht, absoluter Ausdehnung, abs. Schmelz- und Siedepunkt für feste und flüssige Körper in den letzten Jahren eingehend geprüft hat, hat diese Untersuchungen (1880) auf die sp. W. starrer Körper ausgedehnt; die Gesammtwärme c (273 + t) steht hiernach zu der abs. Ausdehnung in dem constanten Verhältnisse 2,6.

435 **Anwendung der specifischen Wärme.** Man wendet die Größen der sp. W. zunächst an, um die Wärmemengen aufzufinden, welche zur Erhitzung eines Körpers bis zu einer bestimmten Temp. nöthig sind. Umgekehrt bestimmt man aus der bekannten sp. W. eines erhitzten Körpers und aus der Wärmemenge, welche derselbe bei der Abkühlung bis zu einem gemessenen Grade an ein Wassercalorimeter abgibt, die Temp. jener Erhitzung. So hat Violle (1879) die sp. W. des Iridiums bestimmt = 0,0317 + 0,000006 t und durch Eintauchen eines Stückes Jr in geschmolzene Metalle deren Schmelzpunkte gefunden: Ag 954°, Au 1035°, Cu 1054, Pd 1500, Pt 1775, Jr 1950, die letzten durch Eintauchen eines Drahtes, an dem beim Herausziehen eine feste Rosette des Metalls hängen blieb. Ebenso findet Victor Meyer die Temp. der Dampfdichtebäder durch Eintauchen eines Stückchens Platin. Andere Beispiele Aufg. 708—711. Die Chemiker benutzen die bekannte sp. W. eines Stoffes, um das Atomgewicht desselben zu bestimmen, indem sie das Dulong'sche Product ac = 6,4 durch die sp. W. dividiren. Pfaundler machte (1866) in einer Untersuchung der sp. W. der Bodenarten darauf aufmerksam, daß eine Bodenart von geringer sp. W. sich rasch erwärmt und rasch abkühlt, während Erde von hoher sp. W. langsames Erwärmen und langsames Abkühlen erfahre, daß feuchte, humusfreie Erden eine hohe sp. W., bis zu 0,5 besitzen, daß dagegen trockene, humusreiche Bodenarten, wie Kalk und Sand nur 0,2 sp. W. haben. Die hohe sp. W. des Wassers trägt zur Ausgleichung der Temperaturextreme in Meeresgegenden, zu der geringen Veränderlichkeit des Inselklimas bei; denn im Sommer wird die Wärme von dem Wasser zu seiner Erwärmung verbraucht und im Winter wird dieselbe langsam wieder abgegeben. Der Winter ist in Irland milder als in der Lombardei, die Myrte kommt dort im Freien fort, aber in dem kühlen Sommer reift die Traube nicht.

436 Aufg. 695. Mischt man die Massen m und m' desselben Körpers, aber von den verschiedenen Temp. t und t', so entsteht welche Mischtemp.? Aufl.: $T = (mt + m't')/(m + m')$. (Richmanns Regel 1750). — A. 696. Welche Mischtemp. entsteht, wenn 8kg Quecksilber von 50° und 12kg von 10° gemischt werden? Aufl.: 26°. — A. 697. In einem Zimmer von 6m L., 3m Br. und 5m H. herrscht eine Temp. von 20°; in einem daneben liegenden Zimmer von 8m L., 4m B. und 5m H. ist eine Temp. von 10°; welche Temp. entsteht beim Oeffnen der Zwischenthüre? Aufl.: 13,6°. — A. 698. Wieviel Wasser von 8° muß man zu 80kg Wasser von 50° mischen, damit eine Temp. von 20° entstehe? Aufl.: 200kg. — A. 699. Man mengte zu 1000kg Wasser von 0° eine Menge von 600kg Wasser und erwärmte dadurch jenes Wasser auf 12°; welche Temp. hatte das letztere? Aufl.: 32°. — A. 700. Welche Temp. erhält eine Mischung von 12kg Quecksilber von 50° und 12kg Wasser von 12°? Aufl.: 13,5°. — A. 701. Man mischt 325g Schwefelkohlenstoff von 1[illegible]° mit 400g Wasser von 20° und erhält eine Mischtemp. von 19,7°; wie groß ist die sp. W. von Schwefelkohlenstoff? Aufl. 0,2. — A. 702. Zwei Stoffe, deren Temp. t und t', und deren sp. W. c und c' sind, sollen zu nkg gemischt, die Temp. T annehmen; welche Menge muß von beiden genommen werden? Aufl.: Vom ersten $c' n (t' - T)/[c (T - t) + c' (t' - T)]$, vom zweiten $cn (T - t')/[c (T - t) + c' (t' - T)]$. — A. 703. Wasser von 30° und Leinöl von 50° (sp. W. = 0,5) sollen 20kg Mischung von 40° geben; wieviel muß von Jedem genommen werden? Aufl.: $6^2/_3$kg Wasser und $13^1/_3$kg Leinöl. — A. 704. Wie groß ist die sp. W. von Zink, wenn 2kg Zink von 80° in 5kg Wasser von 20° eingetaucht, dessen Temp. auf 22° erhöhen? Aufl.: 0,09. — A. 705. Um wieviel wird Queck. von 0° durch ein gleiches Vol. Wasser von 100° erwärmt? Aufl. 224°. — A. 706. Allgemein zu lösen, wenn die sp. W. der beiden Körper c und c', ihre sp. G. s und s' und die Temp. des einen = *t ist?* Aufl. $tcs/c's'$. — A. 707. Man legt in eine Höhlung eines Eisblockes eine Silberkugel von 1kg Gewicht und 200° Temp. und erhält dadurch 152g Wasser von 0°,

wie groß ist die sp. W. des Silbers? Aufl.: 0,06. — A. 708. 1kg geschmolzenes Eisen in eine Eisgrube gegossen bringt 1,37kg Eis zum Schmelzen; wie hoch ist die Schmelztemp. des Eisens? Aufl.: 1200°. — A. 709. Um die Temp. eines Ofens zu bestimmen, bringt man eine Platinkugel von 200g in denselben und wirft sie nach Erhitzung in 1kg Wasser von 20°, welches hierdurch eine Temp. von 30° annimmt; wie hoch ist die Temp. des Ofens, wenn die sp. W. des Platins = 0,03308 + 0,0000042 t beträgt? Aufl.: 0,2 (t — 30) (0,03308 + 0,0000042 t) = 10; hieraus t = 1305°. — A. 710. 3kg rothglühendes Eisen schmelzen in dem Calorimeter von Lavoisier und Laplace 2kg Eis; die Temp. der Rothgluth zu finden? Aufl.: 485°. — A. 711. Die sp. W. des Eisens ist genauer = 0,1053 + 0,000071 t; welches ist die Temp. einer weiß glühenden Eisenkugel von 1kg, wenn dieselbe in 16kg Wasser eine Temperatursteigerung von 12 auf 24° erzeugt? Aufl.: 1079,5°. — A. 712. Ein und derselbe el. Strom geht durch denselben dünnen Draht durch 1kg Wasser und durch 3kg Quecksilber; das Wasser wird auf 10° erwärmt; um wieviel das Quecksilber? Aufl.: $9^2/_3$. — A. 713. Verbrennt man in einem Wassercalorimeter 1g H, so entstehen 34,462c; um wie viele Grade wird ein gleiches Gewicht Alkohol erwärmt? Aufl.: 68,924°. — A. 714. Wie groß ist die sp. W. des Indiums nach Dulongs Gesetz, wenn das Atomgewicht des Indiums = 113,4 ist? Aufl.: 6,4 / 113,4 = 0,0569. — A. 715. Wie groß ist die sp. W. des Indiumoxydes, wenn dessen Fl. In^2O^3 ist, und dieselbe aus den El. berechnet wird? Aufl.: 0,085. — A. 716. Wie groß ist dieselbe nach Neumanns Gesetz, wenn für Basen von der Form R^2O^3 das Product ac = 24 ist? Aufl.: 0,086. — A. 717. Wie groß ist die Volumcapacität des Ammoniakgases, aus seinen El. berechnet, wenn bei der Verbindung von N mit 3 H das Vol. der Gase zweimal so klein wird? Aufl.: 2, die der Luft = 1 gesetzt. — A. 718. Die sp. Gewichtsw. des Ammoniakgases zu finden, die des Wassers = 1 gesetzt? Aufl.: 0,8. — A. 719. Die sp. Raumw. und Gewichtsw. von Stickoxydul N_2O zu berechnen? Aufl.: 1,5 und 0,2342. — A. 720. Die sp. W. von $Cu\,SO_4$ zu berechnen, wenn das Product ac für solche Sulfate 26,5 beträgt? Aufl.: 0,196. — A. 721. Die sp. W. von $Cu\,SO_4$ aus der Zusammensetzung zu finden? Aufl.: 0,166. — A. 722. 1kg Alkoholdampf von 80° geht in einem Schlangenrohre durch ein Wassercalorimeter, das 10kg Wasser von 12° enthält und sich dadurch auf 36° erwärmt; wie groß ist die latente Wärme des Alkoholdampfes? Aufl.: $1 . x + 1 . 0,5 (80 - 36) = 10 (36 - 12)$; hieraus $x = 213$. — A. 723. Durch ein Wassercalorimeter gehen 2kg Aetherdampf von 35°; auf welche Temp. steigen die darin befindlichen 9kg Wasser von 10°? Aufl.: $2 . 90 + 2 . 0,5 (35 - x) = 9 (x - 10)$; hieraus $x = 30,5°$. — A. 724. Zeuner gibt nach der mechanischen Wärmetheorie für die sp. W. von überhitztem Wasserdampf dem bekannten Verhältnisse k folgenden Werth: $1 + {}^1/_3\, T / (T - 38,104 \sqrt[4]{p})$; hierin ist c = 0,4805, die sp. W. bei const. Drucke. Die Gesammtwärme von überhitztem Dampfe ergibt sich dann $= 476,11 + c (T - 38,104 \sqrt[4]{p})$. Hieraus die Gesammtwärme von gesättigtem und überhitztem Dampfe von 5at zu berechnen? Aufl.: Für gesättigten Dampf = 653c, für überhitzten Dampf = 593c, woraus sich die Vortheilhaftigkeit von überhitztem Dampfe ergibt.

6. Die Fortpflanzung der Wärme.

Die Fortpflanzung der Wärme geschieht auf 3 Arten: 1. Durch Strahlung; **437** 2. durch Leitung; 3. durch Strömung. Die *Strahlung* ist das Fortschreiten der Molekularbewegungen eines Körpers auf einen anderen durch Schwingungen oder Wellen des zwischen beiden Körpern befindlichen Aethers; die Wärmestrahlung ist identisch mit der Lichtstrahlung; nur ist der Umfang der Lichtstrahlen kleiner; er beschränkt sich auf Schwingungszahlen von 400 bis 800 Billionen, während die wärmenden Strahlen schon bei 60 Billionen zu beginnen scheinen und sich bis auf 800 Billionen erstrecken, wobei indessen in den letzten 400 Billionen Schwingungszahlen, die bekanntlich das Licht bilden, die Wärmewirkung immer kleiner wird. Die Wärmestrahlung befolgt dieser Identität gemäß die Gesetze der Lichtstrahlen. Durch Wärmestrahlen wird ein Körper nur dann erwärmt, wenn die Schwingungen seines Aethers auf die Körpermoleküle übergehen, wenn also die Wärmestrahlen von dem Körper absorbirt werden. Ist dies nicht der Fall, so schreiten die Aetherwellen ungeschwächt durch den Körper fort, und der Körper verändert seine Temperatur nicht. Dieses Fortschreiten der Wärmestrahlen geschieht mit der Geschwindigkeit, die der Wellenbewegung des Aethers eigenthümlich ist, also mit der Geschwindigkeit des Lichtes. Die Wärmestrahlung geht also durch den leeren Raum,

durch die Luft, durch andere Körper mit der Geschwindigkeit des Lichtes, ohne den durchlaufenen Raum oder Körper zu erwärmen.

Daß heiße dunkle und leuchtende Körper Wärmestrahlen aussenden, ohne die durchstrahlten Körper zu erwärmen, erkennt man leicht daran, daß wir die Hitze eines Ofens, dem wir das Gesicht zuwenden, sofort nicht mehr im Gesicht spüren, wenn wir uns umkehren, daß ein dem heißen Ofen zugewendetes Therm. fällt, wenn man einen Schirm zwischen dasselbe und den Ofen stellt, daß die Sonnenstr. wärmend auf die Erde wirken, während die oberen Luftschichten und noch mehr der äußere Weltraum sehr kalt bleiben. Den entscheidenden Nachweis gab Prévost (1811): auf die eine Seite eines Springbrunnens brachte er ein Licht oder ein heißes Eisen, auf die andere ein feines Therm., und fand aus dem sofortigen Steigen desselben, daß die Wärmestr. durch die stets sich erneuernde und darum unverändert kalt bleibende Wasserschicht sich fortpflanzten. Man hat diesen Versuch noch in der Weise erweitert, daß man durch eine hohle Glaslinse einen dieselbe stets ausfüllenden Strom kalten Wassers gehen ließ und doch mittels der von der Linse vereinigten Sonnenstr. Zunder entzündete. Wenn hiernach die Existenz von Wärmestr. nachgewiesen ist, so zeigt uns das Sonnenspectrum, sowie die Spectren irdischer Gluthen, daß dieselben mit den Lichtstr. identisch sind, daß es aber außer den leuchtenden Wärmestr. auch dunkle Wärmestr. gibt (wie es übrigens jeder heiße, nicht glühende Ofen zeigt), daß diese letzteren eine geringere Brechbarkeit, also eine geringere Schwz., aber eine stärkere Wärmewirkung als die ersteren besitzen. Ueber die Geschw. der strahlenden Wärme existiren zwar keine entscheidenden Versuche; indessen ist Jedermann bekannt, daß Sonnenlicht und Sonnenwärme immer mit einander auftreten und verschwinden, daß also die Geschw. der strahlenden Wärme mit der des Lichtes übereinstimmt.

Die Leitung der Wärme ist das Fortschreiten der Molekularbewegung eines Körpertheiles auf einen anderen, oder eines Körpers auf einen mittelbar oder unmittelbar benachbarten Körper durch Uebergang der Bewegung von einem Molekül zum anderen. Hierbei muß die Bewegung von einem Molekül auf den benachbarten Aether und von diesem auf das folgende Molekül übertragen werden; die Leitung ist also Strahlung von Theilchen zu Theilchen; sie geschieht daher viel langsamer als die Strahlung und nur unter ausnahmsloser Erwärmung aller Zwischentheilchen. Da während dieser langsamen Fortpflanzung der Körper an die Umgebung durch Strahlung und Leitung Wärme verliert, so muß die Temperatur um so niedriger werden, je weiter die Leitung geht. Da außerdem die Moleküle der verschiedenen Körper in der verschiedensten Lage gegen einander sind, so müssen sie auch die Molekularbewegung mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Man unterscheidet daher gute und schlechte Leiter. Die besten Leiter sind die Metalle, die schlechtesten die Luftarten, da die großen Atomzwischenräume sie dem reinen Aetherraume nähern und so die Strahlung überwiegend machen.

Eine Metallstange und eine Holzstange, die man mit den beiden Händen in dieselbe Gluth hält, belehren bald über den Unterschied zwischen guten und schlechten Leitern; daß auch unter den guten Leitern ein bedeutender Unterschied ist, zeigt sich leicht durch Berührung einer Silberstange und einer Eisenstange; die letztere kann man viel länger in der Hand halten als die erstere. Leicht überzeugt man sich, daß die Temp. der Stangen mit der Entfernung von der Gluth abnimmt, ohne daß indeß ein einfaches Gesetz sofort auffindbar wäre. Am interessantesten ist die verschiedene Geschw. der Leitung mittels einer Thermosäule wahrzunehmen. Man setzt auf dieselbe kleine, ganz gleiche Cylinder von Silber, Kupfer, Eisen, Wismuth, Stein, Holz u. s. w., nachdem sie die Temp. der Säule angenommen haben; es erfolgt dann kein Ausschlag der Nadel. Bringt man aber auf den Cylinder immer ein und dasselbe aus kochendem Wasser genommene Eisenplättchen, so erfolgt der Ausschlag, bedarf aber zu gleicher Größe einer sehr verschiedenen Zeit.

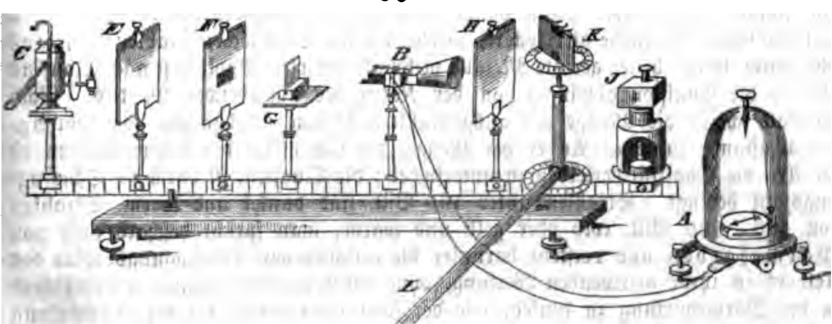
Die Strömung findet statt, wenn flüssige oder Luftmassen an tiefer liegenden Stellen eine höhere Temperatur besitzen als an höher liegenden; vermöge der Ausdehnung werden dann die tiefer liegenden Massen leichter, steigen durch den Auftrieb in die Höhe und bringen so in die höheren Gegenden eine höhere Temperatur.

In dieser Weise geschieht das Erwärmen von Wasser durch ein Feuer unter einem Gefäße; die Leitung spielt hierbei nur eine sehr geringe Rolle, denn durch eine noch so starke Erhitzung von oben geht das Erwärmen von Flüssigkeiten nur sehr langsam vor sich. Auch beruht hierauf das Aufsteigen von Luftströmen und die Entstehung der Winde, sowie Perkins' **Wasserheizung**.

Apparate zum Studium der strahlenden Wärme (Leslie 1804, Melloni 1831). 438 Die gewöhnlichen Quecksilberthermometer zeigen die Wirkung von Wärmestrahlen nicht im Moment des Eintreffens derselben, sondern erst nach einiger Zeit, weil das Quecksilber einer merklichen Zeit zur Erwärmung und Ausdehnung bedarf; in Folge dessen ist eine genaue Messung geringer Wärmeunterschiede mittels dieses Instrumentes nicht möglich. Leslie construirte nach einer Idee von Rumford das Differentialthermometer, in welchem der thermometrische Stoff Luft ist, die wegen ihrer starken Ausdehnung schon eine geringe Temperaturänderung anzeigt und wegen der geringen Menge der verwendeten Luft diese auch rasch anzeigt. Als aber Nobili die Thermosäule erbaut und mit einem empfindlichen Galvanometer zu dem Thermomultiplicator verbunden hatte, das Temperaturunterschiede von $1/5000^0$ angibt, erfand Melloni den seinen Namen tragenden Apparat, der über die strahlende Wärme eine Reihe neuer Aufschlüsse gab.

Leslies Differentialthermometer oder Thermoskop besteht aus 2 mit Luft gefüllten Glaskugeln, die durch eine 2mal rechtwinkelig umgebogene Glasröhre zu einem Ganzen verbunden sind, und von denen die eine berußt ist; in dem horizontalen Theile der Glasröhre schwebt ein gefärbter Schwefelsäurefaden, dessen Bewegungen die Temperaturänderung erkennen lassen. — Nobilis Thermosäule ist die bekannte Verbindung von Antimon- und Wismuthstäbchen, die von genau gleicher Länge zu einer einzigen Kette so aneinander gelöthet sind, daß sämmtliche ungeradzahlige Löthstellen in einer Ebene oder Linie, sämmtliche geradzahlige in einer dazu parallelen Ebene oder Linie liegen, und daß die Stäbchen zusammen ein rechtwinkeliges Parallelepiped bilden. Dasselbe ist von einer Fassung eingeschlossen, die an der einen Löthebene in einen langen Trichter übergeht und an der anderen ein Schiebthürchen trägt; eine um die Fassung gelegte Messinghülse trägt die 2 Klemmschrauben, die mit dem ersten Wismuth- und dem letzten Antimonstäbchen in isolirter Verbindung sind. Melloni setzte die Thermosäule B (Fig. 275) verschiebbar auf eine genau getheilte Messingschiene, das

Fig. 275.



Galvanometer A aber in einiger Entfernung von derselben auf; auf der Schiene befinden sich noch in ähnlicher Weise verschiedene Wärmequellen, wie Locatellis Lampe C, Leslies Würfel J, ganze Doppelschirme E und H, durchbrochene Schirme F, einfache Tischchen G, ein drehbares, eine Kreiseintheilung tragendes Tischchen K, das sich auf einem getheilten Kreise und mit dem sich eine zweite Schiene L in einen beliebigen Winkel gegen die erste dreht u. s. w.

Erscheinungen und Gesetze der strahlenden Wärme. 1. Die Emission. 439 Jeder Körper, dessen Temp. über dem absoluten Nullpunkte liegt, strahlt bei jeder Temp. Wärme aus und empfängt bei jeder Temp. Wärmestrahlen; nimmt er mehr Wärmestrahlen in sich auf, als er aussendet, so steigt seine Temp.; sendet er mehr Wärmestrahlen aus, als er einnimmt, so sinkt seine Temp.; sendet er ebenso viele Wärmestrahlen aus, als er einnimmt, so bleibt seine Temp. constant, er befindet sich im beweglichen Gleichgewichte (Prévost 1804.)

Die schwingenden Mol. jedes Körpers üben einen bewegenden Einfluß auf die ringsum liegenden Aetherat. aus, während umgekehrt die schwingenden Aetherat. stoßend auf die Körpermol. wirken; so erklärt sich der stete Austausch der Bewegungen und das früher un-

erklärliche bewegliche Gleichgewicht. Daß Körper bei jeder Temp. Wärme ausstrahlen, ergibt sich aus folgenden Erscheinungen: Ein Therm. von gewöhnlicher Temp. fällt in der Nähe eines Eisstückes von — 5°, weil es von diesem weniger Wärme empfängt, als es ausstrahlt. In einem Zimmer von 10° Kälte steigt aber das Therm., wenn man ein Stück Eis von — 5° in seine Nähe bringt, weil es dann von diesen mehr Wärme erhält als es ausstrahlt. Steht in einem Raume die Nadel des Thermomultiplicators auf Null und bringt man einen wärmeren Körper in die Nähe der Säule, so bewegt sich die Nadel nach der einen Richtung; bringt man einen kälteren Körper in die Nähe, so geht die Nadel nach der entgegengesetzten Richtung, weil die Säule jetzt mehr Wärme abgibt als sie erhält. In den hellen, langen Sommernächten der tropischen Zone kühlt sich durch Ausstrahlung nach dem kalten Weltraume hin der Boden bis zum Gefrierpunkte ab, was zu der in 420. erwähnten Eisbildung in Indien beiträgt. Hierauf beruht die Entstehung von Thau und Reif.

Unter Ausstrahlung oder Emission versteht man gewöhnlich die Erscheinung, daß ein Körper mehr Wärme aussendet als er einnimmt; umgekehrt unter Absorption die Erscheinung, daß ein Körper mehr Wärme in sich aufnimmt als er aussendet; das erste findet statt, wenn die Temp. des Körpers höher ist als die seiner Umgebung, das zweite im entgegengesetzten Falle. Aus dem Princip des beweglichen Gleichgewichtes läßt sich der Satz ableiten, daß bei derselben Temp. ein Körper dieselbe Wärme emittirt, die er absorbirt, kurz daß Absorption und Emission einander gleich sind. Dieser Satz ist nur ein specieller Fall des in 324. betrachteten Kirchhoff'schen Absorptionsgesetzes und besitzt in der Wärmelehre eine besondere Wichtigkeit, weil in vielen Fällen wohl die Absorption, nicht aber die Emission direct untersucht werden kann, aber durch diese Gleichheit mit jener bekannt ist, wenn jene gefunden worden ist.

Die Größe der Emission, die Menge der ausgestrahlten Wärme wächst zunächst mit der Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und seiner Umgebung, sie ist aber dieser Differenz nicht unter allen Umständen proportional, und die Abweichung von dieser Proportionalität ist sehr verschieden. Hierin liegt auch schon, daß die Menge der ausstrahlenden Wärme von der Natur des ausstrahlenden Körpers abhängt; sie ist am geringsten bei Metallen, größer bei organischen Körpern, am größten beim Ruß. Dann hängt die Größe der Emission von der Beschaffenheit der Körperoberfläche ab; lockere, weiche, dunkele Oberflächen strahlen mehr aus als glatte, harte, helle; geritzte Metalle mehr als polirte. Endlich ist nach Clausius (1864) die Emission abhängig von der Natur des umgebenden Mittels. Nach Tyndall scheint die Menge der ausgestrahlten Wärme unabhängig von dem Aggregatzustande zu sein. Außer der Menge, der Quantität der Wärmestrahlen ist die Art, die Qualität derselben zu untersuchen; die Qualität ist durch die Schwingungszahl bedingt. Strahlen unter 400 Bill. sind dunkel und warm, Strahlen von 400—500 Bill. roth oder gelb und warm; man spricht deßhalb auch von Wärmefarben und versteht darunter die verschiedenen Schwingungszahlen des Aethers in ihrer wärmenden Wirkung, ohne indeß an einen ähnlichen Unterschied in der Wärmewirkung zu denken, wie der Farbenunterschied bei der Lichtwirkung auftritt. Unterhalb 500° strahlen die Körper nur dunkele Wärme aus; ob aber in derselben immer alle Strahlen von 60—400 Bill. enthalten sind oder nicht, ist noch unbekannt. Wenigstens in der Sonnenwärme sind zahlreiche wirkungslose Stellen im Ultraroth aufgefunden worden (324.). In der Wärme von glühendem Platin fand Desains (1868) ein sehr kleines, leuchtendes Spectrum, aber ein dunkles Wärmespectrum, so groß wie das der Sonne und ununterbrochen. Steinsalz von 150° Wärme emittirt dagegen nach Magnus (1869) nur eine Wärmefarbe, nur eine Schwingungszahl, es ist monothermisch, wie Natriumdampf monochromatisch, homogen von Farbe ist; Sylvin (KCl) ist nur nahe monothermisch, die anderen Körper aber strahlen bei 150° verschiedene Wärmefarben aus. Bei 500° fangen nach Draper alle Körper an, roth zu glühen, strahlen also 400 Bill. Schw. aus; bei noch höherer Temp. treten noch höhere Schwingungszahlen hinzu, während sich die niederen mehr verstärken, so daß das Maximum der Wärmewirkung wohl immer im Ultraroth liegt. Wie sich Gase und Dämpfe verhalten, ist in der „Spectralanalyse" betrachtet worden. Aus diesen Thatsachen ist zu

ntnehmen, wie weit der Satz richtig ist, daß die Wärmefarbe der emittirten Strahlen nicht von der Natur des Körpers, sondern nur von seiner Temperatur bhängt; nach Knoblauch (1847) ist sie auch unabhängig von der Farbe derjenigen Wärme, die den Körper erwärmt hat. Durch die Emission kühlt sich ein Körper b, er erkaltet; unter **Erkaltungsgeschwindigkeit** versteht man die Temperaturerniedrigung in einer Minute. Newton hatte aus Versuchen geschlossen, aß dieselbe der Temperaturdifferenz proportional sei; Dulong und Petit aber anden (1818), daß sie bei gleicher Differenz bei höherer Temperatur größer sei ls bei niederer; da außerdem die Natur des Körpers, seine specifische Wärme, die Größe und Emission seiner Oberfläche, die Leitungsfähigkeit der Umgebung und andere Umstände einwirken, so ist das Erkaltungsgesetz verwickelt und noch nicht gefunden.

Die Beweise der vorausgegangenen Sätze ergeben sich entweder leicht aus den allgemeinen Gesetzen, oder sie sind ganz unmöglich, wenn sie specielle von der uns ihrem Wesen ach unbekannten Stoffverschiedenheit abhängige Eigenschaften betreffen; die Nachweise gehören zu den schwierigen Experimentaluntersuchungen. Leslie stellte (1804) vor einem Hohlspiegel einen mit kochendem Wasser gefüllten Metallwürfel auf, dessen verticale Seiten mit Ruß und den anderen Stoffen überzogen waren, deren Strahlung im Verhältnisse zu Ruß estgestellt werden sollte; in den Brennpunkt des Spiegels wurde die eine, mit Ruß überzogene Kugel des Differentialthermometers gebracht. Er fand die Emissionsvermögen, wenn as von Ruß mit 100 bezeichnet wird, für Papier 98, Harz 96, Siegellack 95, Crownglas 90, Eis 85, Glimmer 80, Graphit 75, rauhes Blei 45, Quecksilber 20, blankes Blei 9, Gold, Silber, Zinn, Kupfer 12. Melloni fand für Bleiweiß ebenfalls 100, für gehämmertes polirtes Silber 10, für gehämmertes geritztes Silber 18, für gegossenes polirtes S. 14, für gegossenes geritztes S. 11, was sich daraus erklärt, daß beim harten Metall das Ritzen weichere Stellen bloslegt, während es beim weicheren Metall die gedrückten Stellen ärter macht. Wie eine Rußschicht, so macht auch eine Firnißschicht die Ausstrahlung der Metalle viel größer, und bei beiden Stoffen wächst die Ausstrahlung, wenn man die Schichten is zu einer gewissen Anzahl vermehrt. Wegen der starken Emission von Ruß kühlen sich erußte Gefäße rascher ab als blanke, und überzieht man Oefen und Ofenrohre mit demelben; dagegen müßte man Wasser- und Luftheizungsröhren blank lassen. — Ueber den Einfluß der Farbe führte man gewöhnlich einen Versuch Franklins an, der verschieden gefärbte Tuche auf Schnee legte und aus dem tieferen Einsinken der dunklen Lappen eine tärkere Absorption und daher auch eine stärkere Emission derselben folgerte; Tyndall zeigte 1861), daß dies nicht als allgemeines Gesetz giltig ist. Er bedeckte die 4 Seiten des Lesie'schen Würfels einmal mit verschiedenfarbigem Sammet, ein anderes Mal mit verschieenen Farbstoffen und fand die Emission nicht verschieden. Ebenso widerlegte Tyndall die Angabe Mellonis, daß die feinen Pulver gleiche Ausstrahlung hatten; er fand vielmehr in iner Reihe, die mit Steinsalzpulver beginnt und mit Ruß endigt, eine Zunahme von 35 is 84 in der Größe der Emission. Tyndall untersuchte (1864) die Ausstrahlung der Gase, ndem er sie rings um eine heiße Kugel vorbei und dann an dem Trichter der Thermosäule vorbeigehen ließ; er fand die Strahlung der elementaren, permanenten Gase unmerklich, rhielt aber für CO, CO_2 u. s. w. Ausschläge von 11—60°; er machte hierbei darauf aufmerksam, daß nicht blos hier, sondern auch bei den festen Körpern die Elemente, Metalle, ie geringste Emission haben, sowie unter den Dämpfen Cl u. Br. Noch ausführlicher sind Tyndalls Untersuchungen der Absorption und dadurch auch der Emission, da diese der Absorption gleich ist; besonders wichtig wäre die von ihm behauptete **starke Emission des Wasserdampfes**, die auch von Frankland (1864) durch einen vor dem Trichter der Thermosäule aufsteigenden Dampfstrom direct nachzuweisen gesucht, von Magnus aber bestritten wurde. Diese Untersuchungen sind näher bei der Absorption zu besprechen; bei Gelegenheit erselben ordneten sich die Flüssigkeiten hinsichtlich der Ausstrahlung genau so wie ihre Dämpfe nd zeigten dieselbe Emission wie diese, mochten diese nun zugeführte Wärme oder durch hre eigene Verdichtung entstehende Wärme ausstrahlen, für welch letztere Erscheinung Tyndall en Namen **dynamische Ausstrahlung** anwendet. Auch bei den Gasen zeigte die ynamische Ausstrahlung Uebereinstimmung mit der gewöhnlichen. — Clausius folgerte aus iner Theorie den Satz, daß die Emissionsstärken in den verschiedenen Mitteln in umgehrtem Verhältnisse stehen zu den Quadraten der Geschw. der Strahlen in den Mitteln, einen Satz, den Quintus Icilius (1866) für H und CO_2 experimentell bestätigte. — Ueber die Ausstrahlung rauher Oberflächen kommt Magnus in seiner kurz vor seinem Tode (1870) eschriebenen letzten Arbeit zu dem Schlusse, daß die veränderte Emission derselben nicht der eränderten Härte, sondern dem Brechungsverhältnisse der Substanz für die Wärmestr. zuschrieben werden müsse; die Metalle hätten einen größeren B.-E., deßhalb trete bei ihnen

bald totale Reflexion der von innen herauskommenden Wärme ein, und sie könnten daher nur wenig ausstrahlen; die Ritzen und Rauhigkeiten dagegen böten soviel Ecken und Spitzen, daß die totale Reflexion nur weniger stattfinden könne.

Die Nachweise für die Qualität der Wärmestr. geschehen auf 2 Arten, durch die Spectralanalyse und mittels Durchstrahlungsversuchen. Bei dem ersten Nachweise muß das Sp. mittels eines Steinsalzprismas erzeugt werden, weil alle anderen Stoffe einen Theil der durch sie dringenden Str. absorbiren, während das Steinsalz nahezu alle Wärmefarben gleich gut durchläßt; die einzelnen Theile des Sp. werden dann mit einer linearen Thermosäule untersucht. Die zweite Methode wird in der Lehre von der Diathermanität besprochen.

440 2. **Die Wärmestrahlen gehen von einem warmen Körper nach allen Richtungen, sind in einem isotropen Medium gerade Linien und wirken im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung (Melloni).**

Diese Gesetze gehen sowohl aus der Wellenlehre, als auch aus der Identität der Wärme- und Lichtstrahlen hervor. Der erste Satz ist einfach dadurch nachgewiesen, daß die Thermosäule in beliebiger Stellung rings um einen wärmeren Körper immer eine Bewegung der Nadel nach demselben Sinne hervorbringt, der zweite Satz dadurch, daß die Nadel zurückkehrt, wenn man in die Gerade zwischen der Säule und der Wärmequelle einen Schirm schiebt, der dritte dadurch, daß bei 2, 3, 4facher Entf. der Säule von einer größeren, flächenartigen Wärmequelle, z. B. einer großen Metallplatte, die Nadel ihre Stellung nicht ändert: es gelangt dann in den Trichter die Wärme von einem 4, 9, 16mal größeren Kreise; da aber die Wirkung dieselbe geblieben ist, so ist die Wärmewirkung eines gleichen Flächentheils 4, 9, 16mal kleiner geworden. Mit Leslies Differentialtherm. trifft dieser Versuch nicht zu, weil bei größerer Entf. Str. mit kleineren Ausfallswinkeln auf dasselbe treffen und die Wirkung verstärken. Es ist nämlich die Wirkung der Wärmestr. wie die der Lichtstr. nach Leslie (1804) dem Cosinus des Ausstrahlungswinkels proportional, was nach Fourier (1817) davon herrührt, daß die Strahlung nicht blos von der Oberfläche, sondern auch von inneren Punkten bis zu einer gewissen Tiefe geschieht (284.).

441 3. **Reflexion und Brechung der Wärmestrahlen.** Treffen Wärmestrahlen auf einen Körper, so wird gewöhnlich ein Theil derselben absorbirt, in Körperwärme verwandelt, ein anderer Theil wird unregelmäßig reflectirt oder diffundirt; wieder ein anderer wird regelmäßig so reflectirt, daß der einfallende und der reflectirte Strahl mit dem Einfallslothe in einer Ebene liegen und gleiche Winkel einschließen, und endlich wird manchmal ein Theil durchgelassen und dabei gebrochen nach den bekannten beiden Brechungsgesetzen, nach welchen der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Einfallslothe in einer Ebene liegen und die Sinusse des Einfallswinkels und des Brechungswinkels in dem constanten Verhältnisse stehen, das bekanntlich Brechungsexponent genannt wird (Melloni 1836).

Diese Gesetze gehen sämmtlich in bekannter Weise aus der Wellentheorie der strahlenden Wärme hervor und sind vielfach nachgewiesen, am schärfsten mit Mellonis Apparat. Wird auf das drehbare Tischchen K (Fig. 275) ein Spiegel gestellt, so daß die von der Wärmequelle J ausgehenden Str. mit dem Spiegellothe einen Winkel x machen, der an der oberen Kreistheilung abzulesen ist, so muß die zweite Schiene L mit der ersteren einen an der unteren Theilung abzulesenden Winkel 2x einschließen, wenn die Nadel einen Ausschlag geben soll. Wird auf das drehbare Tischchen ein Prisma gestellt und aus dem Einfallswinkel und dem B.-E. der Brechungswinkel berechnet, so erfolgt der Ausschlag nur, wenn die Stellung der Schiene L diesem Winkel entspricht. Doch waren die Gesetze auch schon durch ältere Versuche dargethan. Mariotte stellte schon um 1680 zwei kugelförmige Hohlspiegel in 20′ Entf. einander gegenüber auf und entzündete ein im Brennpunkte des einen befindliches Stückchen Zunder durch Str. glühender Kohlen, die sich in einem Körbchen am Brennpunkte des anderen befanden; bei diesem Versuche ist das Zusammenfallen des Brennpunktes der Lichtstr. mit dem der Wärmestr. zu beobachten. Es gelten also die Hohlspiegelgesetze, die ja auf den Reflexionsgesetzen beruhen, für Licht und Wärme in gleicher Weise. Ein interessanter Versuch, zugleich zum Nachweise der Gesetze 1. besteht darin, daß man in den einen Brennpunkt Eis, in den anderen ein Therm. oder eine Thermosäule bringt und an derselben ein rasches Sinken der Temp. bemerkt. Berühmte Hohlspiegelversuche sind: Mariotte entzündete Pulver mit einem Hohlspiegel von Eis; Tschirnhausen erbaute 1687 einen Hohlspiegel von 6′ Dm., mit welchem er Silber und Kupfer schmolz, Dachziegel verglaste; Buffon stellte Hunderte von ebenen Spiegeln so zusammen, daß sie einen kugelförmigen Spiegel bildeten, und entzündete getheertes Holz in Entf. von Hunderten von Fußen; vielleicht benutzte Archimedes ähnliche Einrichtungen, als er (nach Zonaras

Schiffe aus der Entfernung in Brand steckte. Wissenschaftlich interessant ist die Diamantverbrennung in dem Brennpunkte eines großen Hohlspiegels durch die Akademie zu Florenz (1694). In ähnlicher Weise ist auch die Geltung der Brechungsgesetze für Wärmestr. indirect seit älterer Zeit nachgewiesen dadurch, daß die convexen Linsen Wärmestr. gerade so vereinigen wie Lichtstr. Strepsiades schmilzt schon in Aristophanes' Wolken mit einem Brennkrystall die in Wachs gegrabene Klageschrift weg. 1793 entzündete man in England mit einer Eislinse Pulver. Bernieres experimentirte (1774) mit einer dreifüßigen Alkohollinse, die sich leicht mit der Sonne drehen ließ, und mittels deren man Eisen schmelzen und selbst Platin anschmelzen konnte.

Die regelmäßige Reflexion geschieht von glatten Flächen, die Diffusion von rauhen Flächen. Melloni hat dieselbe nachgewiesen, indem er auf das Tischchen K statt eines Spiegels eine Scheibe aufstellte, die einerseits mit Bleiweiß, anderseits mit Ruß bedeckt war; die erste Seite ergab sofort beim Auftreffen von Wärme einen starken Ausschlag der Nadel, die andere nicht. Bleiweiß diffundirt also stark, Ruß sehr schwach. Nähere Untersuchungen von Knoblauch (1847) ergaben, daß die Körper die verschiedenen Wärmefarben ebenso in verschiedener Menge diffundiren wie die verschiedenen Lichtfarben, daß z. B. weiße Körper die hellen Str. stärker als die dunkeln, schwarze alle Str. gleichmäßig gering, Metalle dagegen alle Str. gleichmäßig stark diffundiren; die Metalle sind demnach in Bezug auf die Wärme, was Weiß in Bezug auf Licht ist, sie sind wärmeweiß.

442 4. Verschiedene Brechbarkeit der Wärmestrahlen. Die Strahlen verschiedener Wärmequellen von verschiedener Temperatur, sowie auch verschiedene Strahlen einer Wärmequelle haben eine verschiedene Brechbarkeit, ebenso wie die verschiedenen Lichtfarben verschiedene Brechbarkeit besitzen; die geringste Brechbarkeit haben dunkle Wärmestrahlen von niederer Temperatur, eine größere hat die Wärme von leuchtenden Wärmequellen, und zwar ist sie um so größer, je höher die leuchtende Gluth ist (Melloni 1835, Forbes 1838). Man nennt, wie schon erwähnt, die Strahlen von verschiedener Schwingungszahl oder die verschieden brechbaren Arten von Wärme Wärmefarben.

Die verschiedene Brechbarkeit ist eine Folge davon und hat zur nothwendigen Voraussetzung, daß die verschiedenen Wärmefarben eine verschiedene Schwz. besitzen. Melloni untersuchte die Wärmestr. eines heißen Kupferbleches, einer über einer Spiritusflamme glühenden Platinspirale und einer Locatelli'schen Lampe; er fand die Brechung für die erste Quelle am kleinsten, für die letzte am größten; indessen ergab sich auch schon, daß die Lampe verschiedene Wärmefarben ausstrahlte, da die Säule auch bei einer größeren Verschiebung noch Ausschläge erzeugte. Forbes bestimmte nach Wollastons Methode die B.-E., indem er den Grenzwinkel der totalen Reflexion aufsuchte, dessen Sinus bekanntlich dem B.-E. gleich ist; er mußte ein Steinsalzprisma anwenden, weil andere durchsichtige Stoffe die dunkeln Wärmestr. absorbiren, das Steinsalz aber alle Wärmefarben durchläßt. Seine Resultate stimmen mit denen Mellonis; auch er fand, daß die verschiedenen Wärmequellen zwar eine Wärmefarbe vorwiegend, aber auch noch andere und zwar von benachbarter Brechbarkeit ausstrahlen, daß also die Wärme der meisten Quellen, ähnlich wie beim Lichte, ein Wärmefarbengemisch ist. Dasselbe ist schon seit längerer Zeit von der Sonnenwärme bekannt. Nach Magnus (1869) ist nur das Steinsalz monothermisch; es ist der einzige Körper, der nur eine Wärmefarbe ausstrahlt. Nach Kirchhoffs Absorptionsgesetz kann es dann auch nur eine Farbe absorbiren, woraus sich die schon angeführte Thatsache erklärt, daß das Steinsalz alle Wärmefarben durchläßt, allerdings mit Ausnahme der einzigen, die es nach Magnus ausstrahlt. Man sieht hieraus, wie wesentlich die Frage ist über die Fähigkeit der Körper, Wärme durchzulassen, die in der Lehre vom Lichte ihr Analogon in der Durchsichtigkeit hat. Ein Körper läßt nur diejenigen der in ihn eindringenden Wärmestr. durch, die er nicht absorbirt; während also die Absorption der Emission gleich ist, ist sie zur Durchlassung reciprok.

443 5. Die Absorption (Melloni 1835, Tyndall 1862 u. f.). Ein Theil der Aetherwellen, die in einen Körper eintreten, wird gewöhnlich in Molekularbewegung umgewandelt, indem die Aetheratome ihre Schwingungen den Körperatomen mittheilen; diese Strahlen haben ihre Existenz als solche verloren, sie sind absorbirt worden und haben hierdurch den Körper erwärmt. Nach Kirchhoffs Absorptionsgesetz werden diejenigen Strahlen absorbirt, deren Aetherschwingungen mit den Körperschwingungen übereinstimmen und nach Lommels Erweiterung auch die höhere und die tiefere Octave; die übrigen bleiben Aetherbewegung, schreiten als solche durch den Körper und treten auf der anderen Seite desselben als Wärme=

strahlen heraus. Da die Absorption der Emission gleich ist, so gelten für erstere dieselben Gesetze wie für letztere, doch müssen dieselben auch direct abgeleitet und nachgewiesen werden, welch letzteres gewöhnlich einfacher als bei der Emission geschehen kann. Die Absorption ist bei glänzenden, stark reflectirenden, sowie bei stark diffundirenden Körpern gering; Metalle haben die geringste, Ruß die stärkste Absorption. Die Absorption ist verschieden nach der Farbe der Wärme; während Ruß alle Wärmefarben gleich gut absorbirt, verschluckt Bleiweiß vorwiegend die dunkeln und nur wenige helle, und die Metalle absorbiren alle in gleich geringem Maße. Von den durchsichtigen Körpern absorbiren die farblosen meist die dunkeln Strahlen, die gefärbten diejenigen, welche eine andere Farbe haben. Die Absorption der Luftarten fand Tyndall bei den permanenten elementaren Gasen fast Null, dagegen viel beträchtlicher bei anderen Gasen und bei Dämpfen; die dynamische Absorption stand bei den verschiedenen Gasen und Dämpfen in demselben Verhältnisse wie die gewöhnliche; ebenso zeigten die Flüssigkeiten in ihrer verschiedenen Absorption nicht blos dasselbe Verhältniß wie ihre Dämpfe, sondern auch dieselbe Größe, woraus geschlossen wurde, daß die Absorption unabhängig vom Aggregatzustande sei, ein Satz, den Desains (1867) bestätigte.

Leslie (1804) und Melloni (1835) machten zuerst Bestimmungen über die Größe der Absorption oder das Absorptionsvermögen, Leslie mit Würfel, Hohlspiegel und Differentialtherm., Melloni mit einem Kupferblech, dessen eine, berußte Seite einer Wärmequelle, und dessen andere mit der zu untersuchenden Substanz bedeckte Seite der Thermosäule zugewendet war. Beide fanden das Absorptionsvermögen von Ruß gleich groß für alle Wärmefarben und größer als das aller anderen Stoffe; sie setzten dasselbe gleich 100 und fanden dann, daß z. B. Tusch für Locatelli's Lampe das Vermögen 96, für glühendes Platin 95, für Kupfer von 400° 87, für Kupfer von 100° 85 hat; ebenso ergab sich die Absorption von Bleiweiß für die 4 Quellen = 53, 56, 89, 100, von Gummilack 43, 47, 70, 72, von Metall 14, 13,5, 13, 13, woraus ersichtlich ist, daß verschiedene Körper gegen dieselbe Wärmefarbe und ein Körper gegen verschiedene Wärmefarben eine verschiedene Absorption besitzt; Bleiweiß absorbirt mehr dunkle als helle Str., wie es mehr helle als dunkle diffundirt, die Metalle absorbiren und diffundiren die verschiedenen Farben in gleicher Menge. Untersuchungen von Delaprevostaye und Desains für Metalle zeigen größere Verschiedenheiten; Stahl z. B. hat hiernach für Sonnenwärme die Absorption 0,42, für Argands Lampe 0,34, für Locatelli's Lampe 0,175, Platin für die 3 Quellen 0,39, 0,30 und 0,17, wobei das Vermögen von Ruß = 1 gesetzt ist. Die starke Absorption von Ruß benutzt man, indem man die Kugeln seiner Therm., die Flächen der Thermosäule u. s. w. durch einen Rußüberzug sehr empfindlich macht. Auch in der Kleidung, der Hautfarbe macht sich die Absorption geltend; auf ihr beruht die Wirkung der Glasbeete in Gärten; die durch die Glasscheibe gegangene Sonnenwärme wird in dunkle Wärme verwandelt und kann dann wie die Erdwärme nicht mehr durch das Glas hinaus.

Eine ausgedehnte Reihe seiner Untersuchungen über die Abs. der Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten liegt von Tyndall (1859–81) vor. Derselbe schloß die Gase und Dämpfe in ein längeres, weites Rohr ein, das mit Steinsalzplatten geschlossen war, und an dessen einer Seite sich die Wärmequelle befand, während an dem anderen Ende eine Thermosäule stand, die demnach auf ihrer dem Rohr zugewendeten Seite die durch das Gas gegangene Wärme empfing. Indem Tyndall durch eine zweite Wärmequelle auf der zweiten Seite der Thermosäule die Wirkung der ersten compensirte, gab er dem geringsten Ueberschusse auf der einen Seite Gelegenheit zu starker Wirkung, und bestimmte durch diese „Compensationsmethode“, die Menge der durch Gase und Dämpfe absorbirten dunkeln Strahlen. Ist die Abs. z. B. für Luft und die elementaren permanenten Gase bei 1" Druck = 1, so ist sie für Cl = 60, NO = 1590, H_2S = 2000, NH_3 = 7260, SO_2 = 8800; bei Benutzung mehrerer gleicher Röhren ergab sich ein geringerer Einfluß der zweiten, dritten Röhre, so daß die „Wirkung der Summe kleiner ist als die Summe der Wirkungen." Auffällig ist hierbei die geringe Abs. von Cl und Br trotz ihrer tiefen Farbe und die verhältnißmäßig starke Wirkung der chemischen Verbindungen. Die absorbirende Wirkung von Dämpfen verglichen mit Luft unter 1" Druck ist für Schwefelkohlenstoff 62, Benzol 242, Schwefeläther 870, Essigäther 1195. Für Wohlgerüche ergiebt sich die Abs. unter dem Luftdrucke 30 bis 372 mal größer als die der Luft, für Ozon je nach der Temp. 30 bis 136 mal größer als die des reinen O. Für ein größeres Auditorium läßt sich die Abs. der Wärme durch Gase mittels einer Abänderung des Tyndall'schen Versuches von Röntgen (1880) sichtbar machen: In der unteren

Mitte des Rohres geht eine längere Glasröhre herab in ein Gefäß mit gefärbter Flüssigkeit, wie in der Röhre höher steht; sowie nach Wegnahme eines Schirmes die Wärme durch das Steinsalz eindringt, fällt die Flüssigkeit, wenn das Gas absorbirend wirkt, und steigt wieder nach Einschaltung des Schirmes. — Läßt man in das Rohr Gase und Dämpfe einströmen, so erzeugen diese durch ihre Verdichtung Wärme, während sie beim Auspumpen Wärme verbrauchen; Tyndall unterscheidet danach dynamische Ausstrahlung und dynamische Abs.; beim Schwefelkohlenstoff erzeugt z. B. die erstere einen Ausschlag von 14°, die letztere von 6°, beim Essigäther 70° und 43°. — Eine längere Discussion zwischen Tyndall und Magnus erweckte die Angabe des ersteren, daß der Wasserdampf dunkle Str. theilweise absorbire, daß z. B. der atmosphärische Dampf selbst an einem Tage von besonderer Trockenheit 10% der Ausstrahlung der angewendeten Wärmequelle in sich aufnehme. Tyndall schloß hieraus, daß mindestens 10% der von der Erde ausgehenden Wärme schon durch den Wasserdampf der untersten 10′ dicken Luftschicht aufgefangen würden; dies sei von bedeutendem Einflusse auf die meteorologischen Erscheinungen, indem die Ausstrahlung des Wasserdampfes eben so groß sei als seine Abs.; durch diese eigene Ausstrahlung erkläre sich die große Menge des tropischen Regens, die Bildung der Haufwolken als Capitäle aufsteigender Luftsäulen, die große Kälte auf den Höhen, weil diese den Dampf condensiren, und weil der Dampf hier noch rascher durch Ausstrahlung seine Wärme verliere, dann die rasche nächtliche Abkühlung in trockenen, hohen Gegenden, die Regen ohne Wolken u. s. w. Magnus, dessen Versuche über die Abs. der Gase dieselben Resultate wie Tyndalls Arbeiten ergaben, fand dagegen, daß feuchte Luft keine nennenswerth größere Abs. besitze als trockene, und erklärte die in den Röhren Tyndalls beim Einblasen feuchter Luft stattfindende Wärmeabsorption dadurch, daß durch sogenannte Vaporhäsion an den Wänden sich Dampf condensire und daß diese Feuchtigkeit die Wärme in Beschlag nehme. Desains erinnerte für Tyndall an den Satz, daß die Abs. sich mit dem Aggregatzustande nicht ändere, daß also Wasserdampf ebenso wie Eis und Wasser den dunkeln Str. den Durchgang versperre, dieselben folglich absorbire; dem entsprechend zeigten seine Versuche mit einem scharfen Sonnensp. und einem genauen Galvanometer, daß selbst die äußersten dunkeln Sonnenstr. noch durch Wasserschichten von 2mm Dicke gingen, also schon die von Wasser absorbirbaren Str. in der Luft verloren hätten; außerdem zeige das Sonnensp. in dem leuchtenden Theile vom Wasserdampfe herrührende Absorptionsstreifen, folglich dürften auch solche in dem unsichtbaren Sp. vorhanden sein; dagegen enhalte das Sp. von glühendem Platin viele durch Wasser absorbirbare Str., und könne doch nicht angenommen werden, daß die Abwesenheit solcher Str. im Sonnensp. eine specielle Eigenschaft der Sonne sei. Hoorweg hat dagegen (1875) die Versuche Tyndalls wiederholt und zwar im Freien, ohne die bedeckende Röhre und ohne eine Schutzdecke über dem untersuchten Gefäße; er fand, daß Tyndall durch Vaporhäsion getäuscht die Abs. überschätzte und daß Magnus wegen der Kürze seiner Versuchsröhren sie unterschätzte; er glaubt, daß 100m Luft noch nicht die Abs. vollbringen, die Tyndall von 10′ erwartete. Wegen der Wichtigkeit dieser Streitfrage für die Meteorologie stellte Violle Messungen der Abs. der Sonnenstr. durch die Atm. am Montblanc an, indem er die Intensität der Strahlung auf dem Gipfel mit der am Fuße verglich; es ergab sich, daß diese Luftschicht 16% der Sonnenstrahlung absorbire, daß daher die Abs. von 1m atm. Luft 0,0070% betrage, während Tyndall für trockene Luft die Zahl 0,0 860 und für Wasserdampf 4—6% angibt. Lecher und Partner, die (1880) diese Vergleichung anstellten, schließen hieraus, daß die Abs. durch trockene Luft allein hinreiche, die absorbirende Wirkung der Atm. zu erklären und daß der Wasserdampf der Luft hierbei ganz außer Acht bleiben könne, für den ihre Versuche eine Abs. = Null herausstellten, während die trockene Luft eine meßbare Abs. zeigte. Dem gegenüber bleibt Tyndall auch (1881) noch bei seiner Meinung und glaubt dieselbe durch radiophonische Versuche außer Zweifel gestellt: er setzte mit den verschiedensten Gasen und Dämpfen gefüllte Flaschen der intermittirenden Belichtung aus, erhielt mit H und O und Luft keine Töne, dagegen starke Töne mit Wasserdampf, CO_2, NO und vielen anderen Gasen und Dämpfen, und zwar standen die Tonstärken in demselben Verhältnisse zu einander, wie die Abs. bei den älteren Versuchen. Auch Röntgen, der seinen Apparat (1881) in einen genau graphisch darstellenden umänderte, erhielt für trockene, reine Luft und H keine Abs., dagegen eine starke für CO_2, CO und Wasserdampf, und zwar für Str. von verschiedenen Wärmequellen dasselbe Resultat; nur Sonnenstrahlung erfuhr keine Abs., woraus Röntgen schloß, daß Wasserdampf und CO_2 der Atm. die absorbirbaren Sonnenstr. schon absorbirt hätten. In seiner neuesten Arbeit (1884) erhält Röntgen das Resultat, daß Wasserdampf die Fähigkeit besitzt, ultrarothe Str. in bedeutend höherem Maße zu absorbiren als O, N u. H, und daß die Absorption von Wärme durch Wasserdampf für experimentell erwiesen gelten müsse.

Einen weiteren Nachweis für seine Angabe über den Wasserdampf glaubte Tyndall durch seine Untersuchungen der Abs. der Flüssigkeiten zu erhalten. Als Wärmequelle benutzte er eine el. Lampe, d. i. eine in einen Glasballon eingeschlossene Platinspirale, welche durch

einen mittels Rheostat und Tangentenbussole constant gehaltenen el. Strom glühend gemacht wurde; die Flüssigkeiten wurden in eine Steinsalzzelle eingeschlossen, und die Thermosäule durch einen heißen Compensationswürfel sehr empfindlich gemacht. Es ergab sich auch hier, daß die Abs. bis zu einer gewissen Grenze mit der Dicke der Schicht erst rasch, dann immer langsamer wächst; so beträgt sie z. B. für eine 0,02″ dicke Wasserschicht 80,7 %, bei 0,04″ 85 %, bei 0,07″ 88,8 %, bei 0,14″ 91 %, bei 0,27″ 91 %. Das Wasser zeigte die stärkste Abs., dann kommt Alkohol mit 67 % bei 0,02″, dann die Aetherarten, zuletzt Schwefelkohlenstoff mit nur 5,5 %. Als nun die Abs. von solchen Dampfmengen derselben Flüssigkeiten untersucht wurden, welche den Flüssigkeitsmengen proportional waren, ordneten sich die Dämpfe nach ihrer Abs. genau in dieselbe Reihe wie die Flüssigkeiten; Schwefelkohlenstoff bildete das kleinste Ende, am anderen Ende standen die Aetherarten und der Alkohol. Wasserdampf für sich konnte nicht untersucht werden, weil er sich zu leicht condensirt; da man in der Reihe der Flüssigkeiten das Wasser auf den Alkohol folgt, so müsse dies auch in der Reihe der Dämpfe der Fall sein, woraus abermals die starke Abs. von Wasserdampf folge. Tyndall untersuchte dann noch die Abs. von Wärme verschiedener Wärmequellen und fand, daß sie um so kleiner wird, je heller die Str. werden; für eine kaum sichtbare Platinspirale ist z. B. die Abs. des Schwefelkohlenstoffdampfes = 6,5 %, für eine rothglühende Platinspirale 4,7 %, für eine weißglühende 2,9, für eine nahe dem Schmelzp. 2,5 %, für den Leslie'schen Würfel 6,6, für die hellleuchtende Gasflamme 9,8, für den Bunsen'schen Brenner 6,1 %; da aus den ersten Zahlen ersichtlich ist, daß durchsichtige Stoffe die dunkeln Str. stärker absorbiren als die hellen, so folgt aus den letzten Zahlen, daß die hellleuchtende Gasflamme und die Bunsen'sche Flamme viele dunkle Str. enthalten.

444 6. **Die Diathermanität und die Thermochrose.** Die Körper scheiden sich in Bezug auf den Durchgang der Wärmestrahlen in wärmedurchlassende oder **diathermane** Körper und in solche, welche Wärmestrahlen nicht durchlassen oder **adiathermane** Körper. Die diathermanen Körper können eingetheilt werden in thermochroische Körper, die nur bestimmten Wärmefarben von bestimmter Brechbarkeit den Durchgang gestatten und daher auch thermisch gefärbte Körper genannt werden können, und in thermisch nicht gefärbte Körper, welche alle Wärmefarben durchlassen. Die Eigenschaft, Wärme überhaupt durchzustrahlen, nennt man **Diathermanität**, die Eigenschaft, bestimmte Wärmefarben durchzulassen, nennt man **Diathermansie** oder **Thermochrose** (Melloni 1834). Die durchsichtigen Körper lassen meistens die leuchtenden Wärmestrahlen durch, schwächen aber die dunkeln mehr oder weniger; eine Ausnahme bilden Steinsalz und Sylvin (Chlorkalium von Staßfurt), welche allen Wärmestrahlen den Durchgang gestatten, den dunkeln wie den hellen, mit Ausnahme (nach Magnus 1869) der wenigen Strahlen, die sie selbst aussenden. Die undurchsichtigen Körper lassen keine leuchtenden Wärmestrahlen durch, einige in hinreichend dünnen Schichten, wie Ruß, schwarzer Glimmer, schwarzes Glas, Jodlösung in Schwefelkohlenstoff die dunkeln Wärmestrahlen. Farbig durchsichtige Körper sind nur diatherman für Wärme von ihrer eigenen Farbe, und ertheilen daher einem beliebigen Strahlenbündel mittels des Durchganges ihre eigene Wärmefarbe. Noch mehr als Steinsalz sind die trockenen, elementaren Gase diatherman für alle Wärmefarben; andere Gase und Dämpfe lassen dagegen gewisse Strahlen nicht durch.

Ein Körper läßt diejenigen Str. durch, die er an seiner Oberfläche weder reflectirt noch diffundirt, noch in seinem Inneren absorbirt; da die Abs. eine Verwandlung der Aetherschw. in Körperschw. ist, so wird der Körper durch die absorbirten Str. erwärmt, die durchgelassenen aber ändern seine Temp. nicht. Läßt man Sonnenstr. oder Str. einer anderen Wärmequelle durch Wasser gehen und dann durch Eis, so schmilzt das Eis nicht, weil das Wasser die Str. schon absorbirt hat, die das Eis erwärmen könnten. Die durchsichtigen Körper absorbiren die dunkeln Wärmestr., lassen also die hellen durch; die farbig-durchsichtigen Körper absorbiren alle Str. mit Ausnahme derjenigen ihrer Farbe, die sie allein durchlassen; die dunkeln Körper absorbiren die hellen Str., lassen deßhalb höchstens dunkle durch. Die Körper absorbiren also die Wärmestr. von derselben Farbe wie die der von ihnen verschluckten Lichtstr., sie schwächen (Franz 1857) Licht und Wärme in ganz gleichem Maße, worin eine Bestätigung der Identität liegt. Wir nennen die Str. Licht, wenn sie auf unser Auge, Wärme, wenn sie auf das Gefühl und das Therm. wirken. Die Abs. geschieht meist schon in den ersten Schichten, so daß bis zu einer gewissen Grenze die Abs. mit

der Dicke des durchlaufenen Körpers wächst, über diese Grenze hinaus aber die Dicke keinen Einfluß mehr auf die Menge der durchgehenden Str. ausübt; das Strahlenbündel hat nach dem Gange durch die absorbirende Schicht die Wärmefarbe des Körpers gewonnen, geht also ohne weiteren Verlust durch diesen, wie durch eine zweite Platte desselben Körpers.

Die Untersuchungen über die Diathermanität sind sehr zahlreich. Masson und Jamin (1850) prüften die verschiedenen Sonnenstr. und fanden, daß die verschiedenfarbigen leuchtenden Wärmestr. durch Steinsalz, Wasser, Glas, Alaun in ziemlich gleicher Menge gehen, daß durch farbige Gläser weder andersgefärbte Licht- noch Wärmestr., dagegen Licht- und Wärmestr. von der Farbe des Glases in gleicher Menge dringen, und daß endlich die dunkeln Sonnenstr. fast ungeschwächt durch Steinsalz, stark geschwächt durch Glas und Alaun, und gar nicht durch Eis gelassen werden. — Melloni (1835 u. f.) untersuchte die Wärmestr. der Locatelli'schen Lampe, der glühenden Platinspirale, eines auf 390° erhitzten Kupferbleches und der 4 Seitenflächen von Leslies Würfel. Durch Steinsalz gingen 92% der Str. aller 4 Quellen (der Verlust wurde durch Reflexion erklärt); durch Spiegelglas gingen nur resp. 39, 24, 6, 0%, durch Gyps 14, 5, 0, 0%, durch Alaun 9, 2, 0, 0%, durch Eis 6, 0,5, 0, 0%. Aus Mellonis Tabelle, von welcher hier einige Beispiele stehen, gehen verschiedene, meist schon erwähnte Folgerungen hervor; zunächst, daß die Wärme jeder Quelle aus verschiedenen Wärmefarben besteht, daß auch die leuchtenden Wärmequellen dunkle Str. aussenden, und daß nach dem Durchgange die Färbung des Strahlenbündels geändert, der Farbe des ausstrahlenden Stoffes gleich geworden ist; sodann daß die durchsichtigen Körper mit Ausnahme des Steinsalzes die dunkeln Wärmestr. stark absorbiren, die leuchtenden aber durchlassen; ferner daß Wärmequellen niederer Temp. nur Str. geringer Brechbarkeit aussenden, daß mit der Temp. die Menge der dunkeln Str. zunimmt, daß aber auch leuchtende Str. sich zumischen, deren Brechbarkeit sich mit der Temp. erhöht; endlich daß von den durchsichtigen festen Körpern Steinsalz der diathermanste, Eis der adiathermanste ist. Zu ähnlichen Resultaten gelangte Knoblauch (1846); Tyndall (1862) zeigte die Färbung der Str. vom Durchgang; durch Alaun, chromsaures Kali oder Gyps gegangene Str. gehen zu 90, 71 und 91% durch eine zweite Platte von demselben Stoffe; der Verlust ist der Reflexion zuzuschreiben. Ebenso kann man ein mächtiges Bündel durch eine Linse concentrirter Str. auf die Glaskugel eines Differentialthermometers leiten, ohne daß sich die flüssige Säule rührt; denn die Str., welche von dem Glas und der Luft absorbirt werden könnten, sind schon von der Linse herausgenommen worden, gehen also wirkungslos durch die Kugel. „Wir benutzen gläserne Ofenschirme, weil sie das freundliche Licht des Kaminfeuers durchlassen, während sie die Wärme abhalten.“ Auf den Gipfeln der hohen Eisberge steht man in eisig kalter Luft, wenn auch die Sonne heiß auf den Scheitel brennt.

Wie die verschiedenen Wärmefarben in verschiedener Art durchgelassen, absorbirt, gebrochen und diffundirt werden, so haben sie auch eine ungleiche Reflexion. De la Prevostaye und Desains (1849) zeigten, daß von der Wärme einer Locatelli'schen Lampe, je nachdem sie durch Glas oder Steinsalz gegangen war, verschiedene Mengen von Spiegelmetall, Silber, und Platin reflectirt werden; dasselbe fanden sie für die einzelnen Farben der durch ein Prisma zerlegten Wärme einer Lampe, die von Metallen reflectirt wurden. Ausgedehntere Forschungen hierüber wurden von Knoblauch (1845) und Magnus (1869) angestellt: Wärme von erhitztem Steinsalz ausgestrahlt, wird vom Flußspath im Betrage von 28—30% reflectirt, während derselbe von anderen Wärmequellen 6—10% reflectirt. Silber reflectirt 93—99%, Glas 5—14%, Flußspath 6—10% von anderen Wärmequellen; von Sylvinwärme reflectirt der Flußspath 15—17%.

7. Die **Polarisation** und die **Doppelbrechung** der Wärmestrahlen. Die Polarisation der Wärmestr. durch Refl. wurde zuerst genauer von Knoblauch (1848) nachgewiesen; ein schwarzer Glasspiegel in einem Heliostat reflectirte die Sonnenstr. nach und nach unter verschiedenen Winkeln; dann gingen sie durch ein Nicol'sches Prisma auf eine Thermosäule, so daß durch Drehen des Nicol die Menge der polarisirten Str. gefunden werden konnte; es zeigte sich die reflectirte Wärme schon bei einem Einfallswinkel von 25° einigermaßen polarisirt, doch nahm die Polarisation bis 35° zu und dann wieder ab, die stärkste Polarisation findet also bei dem Polarisationswinkel 35° statt wie bei dem Lichte. Melloni und Forbes zeigten (1835) die Polarisation durch einfache Brechung; in den beiden Enden einer metallenen Röhre saßen drehbare Säulen von Glimmerblättchen; am einen Ende stand eine glühende Platinspirale, deren Wärmestr. durch zwei Steinsalzlinsen parallel gemacht wurden, am anderen Ende eine Thermosäule; bei gekreuzter Stellung der Glimmersäule war die Wärmewirkung am geringsten. — Magnus hatte bei der Untersuchung einer glühenden Platinplatte gefunden, daß deren Wärme theilweise polarisirt ist; da nun hier keine andere Ursache der Polarisation möglich ist als die Brechung beim Austritte an der Oberfläche, so mußte ein Theil der Wärme aus dem Inneren kommen, woraus Magnus schloß, daß auch in athermanen Körpern die Wärme sich durch transversale Schw., und zwar der Körper- und Aetherat. fortpflanze. Um diese Folgerung auch für die gewöhnliche dunkle Körperwärme

445

möglich zu machen, zeigte Magnus (1868), daß auch dunkle, von einem 100° warmen Bleche verschiedener Metalle oder von heißem Glase ausgestrahlte Wärme theilweise polarisirt sei, während von rauhem Glase oder von Tuch keine Polarisation zu erkennen war; da bei diesen Stoffen eine regelmäßige Brechung nicht möglich ist, so war die Folgerung von Magnus gerechtfertigt, daß die Polarisation von Brechung herrühre, und Magnus glaubte sich hierdurch zu dem Schlusse berechtigt, daß auch die Wärmeleitung in transversalen Schw. bestehe. — Auch die Doppelbrechung der Wärme wurde von Knoblauch (1848) direct nachgewiesen, indem er ein sehr schmales, vom Heliostat reflectirtes Sonnenstrahlenbündel durch ein Kalkspathrhomboeder gehen ließ und dessen andere Seite mittels einer linearen Thermosäule untersuchte; er fand dort zwei wärmere durch einen kalten Raum getrennte Stellen.

446 8. Die Interferenz und die Beugung der Wärmestrahlen. Fizeau und Foucault erzeugten (1847) mittels zweier unter sehr stumpfem Winkel gegen einander geneigten Spiegel breite Interferenzstreifen und fanden die Temp. in dem mittleren hellen Streifen = 30°, in den beiden seitlichen, dunkeln Streifen nur = 20°. Knoblauch benutzte (1859) ein Interferenzprisma und eine lineare Thermosäule, die eine genaue seitliche Verschiebung zuließ, und beobachtete Unterschiede von 1° in den Ausschlägen der Nadel. Die Beugung eines Strahlenbündels ohne Interferenz fand ebenfalls Knoblauch (1847); er ließ ein Strahlenbündel durch einen scharfen, schmalen Spalt treten und senkrecht zu demselben eine lineare Thermosäule langsam vorbeigehen; das Strahlenbündel fand sich dann breiter als es vermöge der geradlinigen Begrenzung hätte sein müssen. Auch die Beugung mit Interferenz durch ein Steinsalzgitter wurde von Knoblauch (1859) beobachtet; in der Mitte erzeugte seine Thermosäule einen Ausschlag von 17°, in dem ersten Seitenspectrum 3,5°, dazwischen 0°. — Endlich hat Knoblauch (1867) sogar die Interferenzfarben der strahlenden dunklen Wärme, also die Interferenz der polarisirten Wärme in einer äußerst sorgfältigen Untersuchung studirt und die Erscheinungen als ganz übereinstimmend mit denen des Lichtes erkannt. Wird z. B. ein Strahlenbündel durch 2 Nicols und eine dazwischen geschaltete Krystallplatte geleitet, so geht die Wirkung mittels der Drehung des einen Nicol durch die Farblosigkeit in die complementäre über. Hiernach ist denn die Identität der Wärmestrahlen mit Licht über allen Zweifel erhoben.

447 **Erscheinungen und Gesetze der Wärmeleitung.** 1. Feste Körper. Die Leitungsfähigkeit der festen Körper ist sehr verschieden; Silber ist der beste Wärmeleiter; bezeichnet man die Leitungsfähigkeit desselben mit 100, so ist sie nach Wiedemann und Franz (1853) für Kupfer 73,6, für Gold 53,2, für Messing 23,1, für Zink 19, für Zinn 14,5, für Eisen 11,9, für Blei 8,5, für Platin 8,4, für Neusilber 6,3, für Wismuth 1,8. Diese Zahlen sind nur Verhältnißzahlen; man hat auch die absoluten Wärmemengen zu bestimmen gesucht, welche durch Platten von 1^{cm} Dicke und 1^{qcm} Querschnitt bei einer constanten Temperaturdifferenz von 1° in 1 Minute gehen und hat dieselben innere Leitungscoëfficienten k genannt; man erhält die mittleren Werthe derselben ungefähr, wenn man die Wiedemann'schen Zahlen mit 0,9031 multiplicirt; so ist k für Silber 90,31, Kupfer 66,47, für Eisen 10,74, für Platin 7,58, für Wismuth 1,62, für Quecksilber 1,06 Wärmeeinheiten. Die Wärmeeinheit ist jedoch nicht 1°, sondern der 1000ste Theil derselben, also die Wärme, die 1^{g} Wasser um 1° erwärmt. Ist die Dicke eines Körpers $= d$, und sind die Temperaturen an beiden Enden constant a und b, so ist die durch den Querschnitt gehende Wärmemenge $= k(a-b)/d$. Da bei der Voraussetzung constanter Temperatur an der einen Seite aus der Luft, deren Temperatur $= c$ sei, eine gleiche Wärmemenge in den Körper übergehen und am anderen Ende aus dem Körper in die Luft von der Temperatur c' austreten muß, so ist $k(a-b)/d = h(c-a) = h'(b-c')$, worin h und h' die Coëfficienten der äußeren Leitung genannt werden.

Die mathematische Theorie der Leitung ist sehr verwickelt; etwas vereinfacht wird dieselbe durch die eben gemachte Voraussetzung, daß die fortgeleitete Wärme der Temperaturdifferenz proportional sei; man erhält dann durch höhere Rechnung nach Biot (1816), daß in einer am einen Ende erhitzten Stange die Temperaturen nach einer geometrischen Reihe abnehmen, wenn die Abstände von der Wärmequelle in einer arithmetischen Reihe wachsen, woraus sich nach Despretz (1828) der Satz ergibt: die Wärmeleitungsfähigkeiten verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen, für welche die Wärmedifferenzen mit der Luft einander gleich sind. Nach diesem Satze machten

Desprez, sowie Wiedemann und Franz ihre Bestimmungen der Wärmeleitungsfähigkeit. Nur in Körpern mit gleichem Gefüge nach allen Seiten ist auch die Wärmeleitung nach allen Richtungen dieselbe, so z. B. in den Krystallen des regulären Systems. Nach Senarmont (1849) ist sie bei Krystallen der anderen Systeme nur in den Ebenen gleicher Axen gleich groß, z. B. im quadratischen und hexagonalen System in allen zur Hauptachse senkrechten Richtungen, in allen übrigen dagegen größer oder kleiner. Im regulären System bilden alle Punkte, auf denen die von einem Punkte ausgehende Wärme zu gleicher Zeit und in gleicher Stärke anlangt, eine Kugel; bei den zwei folgenden genannten Systemen ist diese isotherme Fläche ein Rotationsellipsoid, bei den drei übrigen Systemen ein dreiachsiges Ellipsoid. Knoblauch fand (1859), daß auch die Hölzer in der Richtung der Fasern die Wärme besser leiten als in der dazu senkrechten Richtung, und Tyndall entdeckte (1862) kleine Unterschiede zwischen der Leitung in der Richtung senkrecht zu den jährlich abgelagerten Holzschichten und parallel zu denselben.

Die ältesten Bestimmungen der Wärmeleitung wurden mit dem Ingenhouß'schen Blechkasten gemacht, in dessen eine Seitenfläche durch Korke die zu untersuchenden Stäbe eingesteckt und inwendig durch eingegossenes heißes Oel erwärmt wurden; die äußeren Stabtheile waren mit Wachs überzogen, das durch die fortgeleitete Wärme um so rascher schmolz, je größer die Leitung war. Indessen ist diese Methode unzuverlässig, schon deßhalb, weil auch die sp. W. hier mitwirkt und die Wirkung einer guten Leitung durch eine hohe sp. W. ganz aufgehoben werden kann. — Biot hat sein Gesetz nachgewiesen, indem er in Stäbe in gleichen Entf. kleine Vertiefungen anbrachte, diese mit Quecksilber ausfüllte und kleine Therm. in dieselben setzte. Nach dem Satze von Desprez bestimmte dann derselbe mittels dieser Methode die Wärmeleitung verschiedener Stoffe, und Wiedemann und Franz schlugen dasselbe Verfahren ein, nur machten sie genauere Messungen mittels der Thermosäule.

Senarmont überzog Krystallplatten mit einer dünnen Wachsschicht und erwärmte sie von der Mitte aus, indem er in eine dort angebrachte Oeffnung das Ende eines heißen Drahtes einsetzte; das Wachs schmolz dann in der Figur eines Kreises oder einer Ellipse, woraus die oben angegebenen Folgerungen gezogen wurden. Knoblauch schlug ähnliche Methoden für Hölzer ein, und Greiß untersuchte eine große Reihe anderer flächenartigen organischen Körper und fand meistens elliptische Abschmelzungen. Tyndall erwärmte Holzwürfel durch einen vom elektrischen Strome erhitzten Rost von Platindraht und maß die Erwärmung auf der anderen Seite durch einen Thermomultiplicator.

Die schlechtesten festen Leiter sind die lockeren organischen Stoffe, weil sie in ihren Lücken mit Luft erfüllt sind, die der schlechteste Leiter überhaupt ist, und die in diesen Fällen sich wegen ihrer Eingeschlossenheit nicht durch Strömung erwärmen kann. Gegenstände, die man vor dem Erfrieren schützen will, umwickelt man mit Stroh oder dergl.; unsere Kleider und Betten halten uns warm, weil sie aus schlechten Leitern bestehen und daher unsere Wärme nicht hinauslassen; die Asche hat wegen ihrer schlechten Leitung vielfache Verwendung in Mauerwerken, Schornsteinen, Geldschränken, calorischen Maschinen u. s. w.; Vorthüren und Vorfenster bringen eine schlecht leitende, stagnirende Luftschicht zwischen warme Zimmer und kalte Räume; der schlecht leitende Schnee schützt Pflanzen vor dem Froste; die gute Leitung des Drahtgehäuses der Davy'schen Sicherheitslampe läßt die Flammenhitze nicht nach außen; an hölzernen Handgriffen heißer Thüren u. s. w. verbrennt man sich nicht; schlechte Leiter fühlen sich bei gleicher Kälte weniger kalt an als gute, und bei gleicher Hitze weniger warm; Quecksilber von 50° bringt dieselbe Hitzeempfindung durch Berührung hervor als Wasser von 60°, Holz von 80 und Luft von 120°; daher konnten Blagden und Chantrey, zwei englische Maler, es längere Zeit in einem Backofen aushalten, dessen Hitze die Siedehitze des Wassers überstieg, wobei allerdings der durch Verdunstung entstehende Wärmeverbrauch das Fleisch und die Haut schützte. Pulver sind ebenfalls schlechte Wärmeleiter, daher der Nachtheil des Kesselsteines, der eine Pulverkruste darstellt. In einer Papierdüte läßt sich Wasser zum Kochen und Blei zum Schmelzen bringen, ohne daß das Papier brennt, indem Blei und Wasser durch Leitung oder Strömung jede dem Papier zugeführte Wärme sogleich fortführen. Wegen der Uebereinstimmung der Leitungsfähigkeit der Metalle für Wärme und Elektricität hat man eine etwaige Veränderlichkeit der ersteren mit der Temp. aufzufinden gestrebt, da eine analoge Veränderlichkeit der zweiten unzweifelhaft feststeht. Schon Forbes in seinen eingehenden Untersuchungen der Wärmeleitung (1860—65) hat für das Schmiedeeisen eine Abnahme der Wärmeleitung bei steigender Temp. wahrgenommen; auch andere Forscher erkannten eine geringe Veränderlichkeit an, während Lorenz (1872) dieselbe bestritt, und Herwig (1874) wenigstens für das Quecksilber die Constanz der Leitungsfähigkeit experimentell nachwies. Tait glaubt nun nach mehrjährigen Versuchen (1878) feststellen zu können, daß beim Eisen die Leitungsfähigkeit mit wachsender Temp. abnehme, aber beim Kupfer, Neusilber und Blei, wenn auch in geringerem Grade, zunehme.

2. Flüssige und luftartige Körper. Gewöhnlich geschieht die Wärmeverbreitung in flüssigen und luftartigen Körpern durch Strömung, denn die Leitung 448

derselben ist äußerst gering; nach Despretz (1839) sollte die Leitungsfähigkeit des Wassers 100mal geringer als die des Kupfers sein, nach Paalzow (1868) bilden die Flüssigkeiten folgende Reihe: Quecksilber, Wasser, Kupfervitriol, Schwefelsäure, Zinkvitriol, Kochsalzlösung, in welcher die erste am besten, die letzte am schlechtesten leitet. Die erste genauere Zahlenbestimmung ist von Angström (1864), der für Quecksilber k = 1,06 fand. Nach dessen Methode bestimmte Lundquist (1869) die Leitungsfähigkeit verschiedener Flüssigkeiten; es ergab sich für Wasser k = 0,0933, so daß hiernach die Leitungsfähigkeit des Wassers 700mal so klein als die des Kupfers wäre. Die neueste Bestimmung ist von Winkelmann (1874); dieselbe ergab übereinstimmend mit der vorerwähnten für Wasser k = 0,0924; nicht viel kleiner ist die Leitung von Alkohol, k = 0,0903, dagegen größer für Kochsalzlösung k = 0,1605.

Die ersten Untersuchungen der Flüssigkeiten geschahen in Gefäßen, die von oben durch heißes Oel oder brennenden Weingeist erwärmt wurden, und an denen seitlich mehrere Thermometer mittels Korkstöpsel in die Flüssigkeit eingeführt waren; bei einem Versuche von Despretz dauerte es 30 Stunden, bis Wasser von oben her gleichmäßig erwärmt war. In einem schief gehaltenen Probirgläschen kann man oben Wasser kochen, während ein unten liegendes Eisstückchen nicht schmilzt. Angström und Lundquist verfuhren nach einer mathematisch begründeten Methode, die auch von Forbes und Neumann mit Modificationen für feste Körper angewendet wurde; ein Stab oder eine flüssige Säule von so großer Länge, daß das eine Ende immer die Temp. der Umgebung behielt, wurde am anderen Ende abwechselnd erhitzt und abgekühlt, und nach bestimmten Zeiten wurde an zwei gegebenen Stellen des Stabes die Temp. gemessen und darnach k berechnet. Winkelmann verfuhr nach der Methode von Stefan (1872): Ein Hohlcyl. mit doppelten Wänden von Messing enthält in seinem weiten Mantel die zu prüfende Flüssigkeit und im Inneren Luft, welche ein Luftthermometer bildet, indem ein doppelt umgebogenes Glasrohr aus dem Inneren in ein Quecksilbergefäß geht. Wird nun der Cyl. ganz in schmelzenden Schnee gebettet, so kühlt sich durch die Leitung der Flüssigkeit diese und die Innenluft ab; das Steigen des Queck. gewährt die Mittel zur Berechnung von k. — Die Schwierigkeit der Untersuchungen erklärt die Verschiedenheit der Angaben. Während nach Guthrie alle Lösungen besser leiten sollen als Wasser, gibt Paalzow das Wasser als den besten Leiter an, und steht dasselbe nach Lundquist zwischen Kochsalz- und Zinkvitriollösung. Nach Winkelmann ist die Leitung von Wasser kleiner als die von Lösungen und größer als die von Alkohol und Glycerin.

Noch Rumford hatte die Meinung, daß die Flüssigkeiten keine Wärmeleiter seien und sich nur durch Strömung erwärmen könnten. Die mechan. Wärmetheorie hätte diese schon durch Experimente beseitigte Ansicht unmöglich zugeben können, da nach derselben die Mol. auf einander stoßen und sich daher ihre leb. Kft. gegenseitig mittheilen müssen; in den Flüssigkeiten sind zwar die Mol. weit von einander entfernt, so daß die Strahlung hier überwiegend werden kann; dafür sind aber immer zahlreiche Mol. in fortschreitender Bewegung, bis sie gegen andere stoßen und daher diesen Bewegung mittheilen; dasselbe muß in Luftarten der Fall sein, da hier alle Mol. in fortschreitender Bewegung bis zum Zusammenstoße begriffen sind. Obwohl zwar wegen der großen Abstände der Mol. die Fortpflanzung der Wärme durch den Aether, die Strahlung überwiegend sein muß, so muß doch nach der mechan. Wärmetheorie auch eine Wärmeleitung in den Gasen stattfinden, und zwar muß sie im Wasserstoff, dessen Mol. die größte Geschw. haben, am größten sein. Clausius berechnete gleich anfangs, daß die Leitung des Wasserstoffs 7mal so stark, als die der Luft sein müsse.

Die **Luftarten** hielt man früher für Nichtleiter; man erklärte die Wärmeverbreitung in denselben durch Strömung; daß aber die Erkaltung eines und desselben Körpers in verschiedenen Gasen nicht gleich rasch erfolgt, daß z. B. ein von einem elektrischen Strome durchflossener Platindraht in Kohlendioxyd schon glüht, wenn er in Wasserstoff noch dunkel bleibt, veranlaßte Magnus (1861) zu genaueren Forschungen, welche für den Wasserstoff eine allerdings geringe Leitungsfähigkeit ergaben und auch für die übrigen Gase eine, aber noch geringere Leitung unverkennbar machten. Maxwell berechnete sodann rein theoretisch mit Hilfe der molekularen Geschwindigkeiten der Gase und der mittleren Weglänge der Moleküle die Leitungsfähigkeit der Luft und fand, daß dieselbe gleich dem 3500ten Theil von der Leitung des Eisens und innerhalb gewisser Grenzen unabhängig vom Drucke sei; diese auf Grund der mechanischen Wärmetheorie unternommene Ver-

aussagung wurde durch die Versuche von Stefan (1872) bestätigt. Neuere Versuche von Kundt und Warburg (1875) ergeben nahezu dieselben Zahlenresultate, bestätigen das Gesetz über den Druck, zeigen aber, daß bei einer an Luftleere grenzenden Verdünnung die Wärmeleitung unmerklich klein ist.

Magnus erwärmte seinen Gasraum, in welchem ein gegen Strahlung geschütztes Therm. steckte, durch siedendes Wasser von oben, und fand, daß H eine höhere Temp. empfing als der leere Raum, woraus dessen Leitungsfähigkeit resultirte, daß aber andere Gase eine niedrigere Temp. hatten als der leere Raum; daraus folge aber nicht, meinte Magnus, die Nichleitung dieser Gase, sondern nur, daß sie von der seitlichen Strahlung mehr absorbiren als der leere Raum. Vergleicht man nun die bekannte Abs. mit diesen beobachteten Temp., so ergeben sich Verschiedenheiten, welche nur von Leitung herrühren können und diese für Ammoniak und ölbildendes Gas am größten zeigen. Stefan fand nach seiner schon erwähnten Methode für Luft k = 0,003 348, so daß die Leitungsfähigkeit des Kupfers (k = 66,47) 20000 mal und die des Eisens (k = 10,74) 3400 mal so groß als die der Luft ist. Die Versuche von Kundt und Warburg ergaben, daß der Leitungscoëff. des CO_2 0,59 und der von H 7,1 mal so groß als der der Luft ist. Diese Uebereinstimmung der Versuchsresultate mit den Rechnungsresultaten der mech. Wärmetheorie, das Eintreffen der theoretisch vorausgesagten Erscheinungen der Art und Größe nach bildet eine solche Stütze der neueren Wärmelehre, daß kaum mehr an der Wahrheit derselben gezweifelt werden kann. Nach der Theorie wächst die Wärmeleitung der Gase mit der Temp.; auch dieses vorher unbekannte Ergebniß der Theorie wurde durch Versuche von Winkelmann (1876) bestätigt, indem derselbe fand, daß die Leitung bei 100° etwa 1,3 mal so groß als bei 0° ist. Nach Clausius soll die Leitung der Quadratwurzel, nach Maxwell der ersten Potenz der abs. Temp. proportional sein; W. hält dafür, daß seine Versuche für letztere Angabe sprechen.[1]

Achte Abtheilung.

Der Magnetismus.

Magnetische Anziehung und magnetische Richtkraft. An manchen Orten 449 der Erde findet sich ein Eisenerz, das die Eigenschaft hat, kleine Eisentheile anzuziehen und festzuhalten; die Mineralogen nennen das Erz Magneteisenstein, die Physiker sagen, das Erz sei ein natürlicher Magnet, und nennen überhaupt jeden Körper einen Magnet, der die Kraft hat, Eisen anzuziehen und festzuhalten; erste Grunderscheinung des Magnets. Diese Kraft kann auch Stahlstäben dauernd verliehen werden, die man alsdann künstliche Magnete nennt; sie erhalten ihren Magnetismus dadurch, daß sie an natürlichen oder anderen künstlichen Magneten gestrichen werden; insbesondere benutzt man hierzu die stärksten Magnete, die man künstlich erzeugen kann, die Elektromagnete, d. s. schmiedeeiserne Stäbe, welche durch Elektricität vorübergehend zu Magneten gemacht wurden.

1. Hängt man an einem Faden ein Stück Eisen auf und nähert ihm einen M., so bewegt sich das Eisen durch die Luft nach dem M. hin und haftet fest an demselben; hängt man einen M. an einem Faden auf und nähert ihm ein Stück Eisen, so bewegt sich der M. durch die Luft zu dem Eisen und haftet an demselben. 2. Bringt man andere Körper in die Nähe eines M., so ist diese Erscheinung nicht merkbar. 3. Bringt man zwischen den M. und das Eisen Papier, Glas, Holz, so findet die Anziehung dennoch statt; dagegen wird die Wirkung durch Eisen sehr geschwächt. 4. Legt man einen M. in Eisenfeilspäne, so häufen sich dieselben nicht überall gleich stark an; an zwei Stellen, bei Stäben gewöhnlich an den Enden, hängen die meisten Späne, zwischen beiden Stellen nimmt die Menge der Späne sehr rasch ab und ungefähr in der Mitte zwischen beiden Stellen hängen keine Späne. Ebenso wird ein an einem ungedrehten Seidenfaden hängendes Eisenkügelchen von jenen zwei Punkten aus größter, von anderen aus immer geringerer Entf. angezogen, von dem mittleren Zwischenpunkte gar nicht. Aus diesen Versuchen ergeben sich folgende 4 Eigenthümlichkeiten der magnetischen Anziehung:

1. Magnet und Eisen ziehen einander an. 2. Andere Körper als Eisen bringen mit dem *gewöhnlichen* Magnet keine anziehende Wirkung hervor. 3. Die

Anziehung geschicht nicht blos durch die Luft, sondern auch durch andere Körper, mit Ausnahme des Eisens. 4. Die Anziehung eines Magnets ist an zwei Stellen, die man die Pole nennt, am stärksten; zwischen den Polen nimmt die Anziehung mit wachsender Entfernung immer mehr ab, und ist an der mittleren Zwischenstelle, Indifferenzzone genannt, gar nicht vorhanden. Die Magnetpole liegen bei einem Stabe zwar nahe, aber nicht ganz an den Enden.

Das Gesetz 2. gilt durchaus nicht ohne Grenzen; erreicht ein M. eine ungewöhnliche Stärke, so wirkt er nicht blos auf Eisen, sondern auch auf die meisten anderen Körper; sie werden von den beiden Polen entweder angezogen oder von beiden Polen abgestoßen; die von beiden Polen angezogenen Körper werden paramagnetisch, die von beiden Polen abgestoßenen Körper diamagnetisch genannt. Am stärksten paramagnetisch ist demnach das Eisen und eisenhaltige Körper; dann folgen Nickel und Kobalt; am stärksten diamagnetisch ist das Wismuth; selbst die meisten Flüssigkeiten und Gase sind entweder paramagnetisch oder diamagnetisch.

Außer der Anziehung hat ein Magnet noch eine zweite Grundeigenschaft, die nämlich, bei freier Beweglichkeit eine bestimmte Lage anzunehmen. Hängt man einen Magnetstab mittels eines ungedrehten Seidenfadens frei auf, oder setzt man eine Magnetnadel, d. i. ein dünnes Magnetstäbchen, gewöhnlich von der Form einer sehr lang gestreckten Raute, mittels eines Achathütchens auf die Spitze eines aufrechten Messingständers, so nimmt der Stab oder die Nadel eine ungefähr nordsüdliche Lage an, d. h. der eine, und zwar immer derselbe Pol richtet sich ungefähr nach Norden, der andere zeigt nach Süden. Diese Eigenschaft nennt man die Richtkraft des Magnetes; der nach Norden zeigende Pol wird Nordpol, der entgegengesetzte Südpol, die gerade Verbindungslinie beider Pole die Achse des Magnetes genannt. Bei genauer Messung wird ersichtlich, daß der Nordpol eines Magnetes meist nicht genau nach Norden zeigt, sondern etwas von dem Meridian abweicht; der Winkel, den die Magnetnadel mit dem Meridian macht, wird Declination, und die durch die Nadel gelegte Verticalebene magnetischer Meridian genannt. Ebenso ist ein vollkommen frei in seinem Mittelpunkte aufgehängter Stab nicht horizontal gerichtet, wie es die nach der zweiten Methode aufgesetzte Nadel wegen ihrer Aufhängung sein muß, sondern das Nordende des Stabes richtet sich bei uns nach unten; der Winkel, den die Magnetnadel mit der Horizontalen einschließt, wird Inclination genannt. Die Declination beträgt bei uns jetzt 15° westlich, die Inclination 64°. Genauere Messungen an verschiedenen Orten haben gezeigt, daß sowohl die Declination wie die Inclination nach Ort und Zeit verschieden sind. Die Declination ist in Europa, Afrika und auf dem atlantischen Ocean westlich, in Amerika, dem großen Ocean und Asien östlich. In der nördlichen Erdhälfte neigt sich der Nordpol, in der südlichen der Südpol nach unten. Genaueres in der Lehre vom Erdmagnetismus.

Die Richtkraft des M. hat wichtige Anwendungen im Compaß und in der Bussole. Der Schiffscompaß hat eine Cardanische Aufhängung und ein etwas tiefes mit Blei ausgegossenes Gehäuse, damit dasselbe bei den Schwankungen des Schiffes sich immer selbst in die verticale Lage stelle. Auf einem Papierkreise sind die 32 Weltgegenden, die sogenannte Windrose, verzeichnet, das Papier ist auf ein Glimmerblättchen geklebt, und dieses ist so mit der Nadel fest verbunden, daß die Mittelpunkte zusammenfallen, und daß die Nadel in die Mittellinie der Windrose fällt, daß also die Windrose sich immer mit der Nadel dreht. Das Instrument ist in der Nähe des Steuermanns aufgestellt, und an dem Compaßgehäuse werden zwei Striche so angebracht, daß ihre Verbindungslinie in diejenige Richtung der Windrose fällt, welche eingeschlagen werden soll; der Steuermann hat dann nur dafür zu sorgen, daß der Kiel des Schiffes jener Linie parallel und der Winkel jener Linie mit der Nadel derselbe bleibt. Bei den Landcompassen ist die Nadel gewöhnlich frei von dem getheilten Kreise; man kann die Weltgegenden eines Ortes mittels desselben nur dann genau bestimmen, wenn man die Declination des Ortes kennt. Ist dieselbe z. B. 15° westlich, so stellt man das Gehäuse so, daß die Nadel um 15° des über oder unter derselben angebrachten getheilten Kreises nach Westen hin abweicht; dann geben die Weltrichtungen des Compasses auch die des Ortes an. In der Bussole, die zu Winkelmessungen am Himmel

und auf der Erde benutzt werden kann, ist außer dem getheilten Kreise ein Diopterlineal oder ein Fernrohr mit Fadenkreuz vorhanden; man stellt sich im Scheitel des Winkels auf, visirt in der Richtung der beiden Schenkel und subtrahirt die beiden Angaben der Nadel, so hat man die Winkelgröße. Der Compaß erfährt durch Eisenmassen, die sich auf Schiffen befinden, besonders also auf eisernen Schiffen, eine Ablenkung oder Deviation, welche, um richtige Angaben zu erzielen, von der Compaßangabe abgerechnet werden muß. Nach Poisson berechnet man auf der Kriegsmarine für jedes Schiff den Einfluß der Eisenmassen und berichtigt darnach die Compaßbeobachtungen. Auf Handelsschiffen wird die Wirkung des Schiffeisens durch Magnete und Eisenmassen, die in die Nähe des Compasses gelegt werden, compensirt. Eine ähnliche Correctur muß auch in Gebäuden, in denen sich magnetische Observatorien befinden, bei genauen Messungen vorgenommen werden, da nach Gherardi (1863) selbst die Back- oder Ziegelsteine magnetisch sind. — Die Richtkraft der Magnete kann auch schon an auf Wasser schwimmenden Nähnadeln beobachtet werden.

Die erste Entdeckung und die Namensabstammung des Magnets verlieren sich im Dunkel der Sage. Nach Plinius (hist. nat. 36. 35.) stammt der Name von dem Hirten Magnes, dessen Schuhnägel und Stabspitze am Berge Ida festhafteten (clavis crepidarum et baculi cuspide haerentibus, cum armenta pasceret); nach Aristoteles soll der Name von Magnesia am Berge Sipylus nordöstlich von Smyrna stammen, wo indeß nach Quenstedt nur Talk vorkommt. Die Richtkraft soll von den Chinesen schon seit ältester Zeit auf Reisen benutzt worden sein. Im Occident des großen Continents wurde sie nach den Angaben der Historiker zuerst im 14. Jahrhundert von Flavio Gioja aus Amalfi zur Schifffahrt verwendet, doch scheint sie schon früher bekannt gewesen zu sein. Die ägyptischen Priester setzten ihren Göttern Augen ein, die sich immer nach Osten, dem astrologischen Paradiese richteten; Are Frode, ein skandinavischer Schriftsteller des 11. Jahrh., erzählt, daß Flocke Vilgerdarson, ein berühmter Wikinger, im Jahre 868 ausgezogen sei, um Gardarsholm (Island) aufzusuchen, und daß er als Wegweiser drei Raben mitgenommen habe, weil damals die Seefahrer in den nördlichen Ländern noch keinen „Leitstein" gehabt hätten; im 12. Jahrh. wird in einem provençalischen Gedichte von Guyot eine Nadel beschrieben, die auf Stroh im Wasser schwimmend sich nach Norden wende. Auf der Universität Leyden wird ein Manuscript von 1269 aufbewahrt, in dem die Abweichung des M. von der Richtung nach Norden besprochen ist. — Der Magneteisenstein, der chemisch Eisenoxyduloxyd $= Fe_2O_3 + FeO = Fe_3O_4$ ist, findet sich nicht blos in Lagern, sondern in ganzen Gebirgsstöcken im Gneiß und Glimmerschiefer; doch ist Deutschland nicht reich daran, um so reicher ist der Norden: die Vorkommnisse von Arendal, Utöen, Danemora in Schweden sind berühmt und geben das beste Eisen, den englischen Stahl; der Taberg bei Jönköping am Wettersee ist ein 400′ hoher Eisenkoloß. Im Ural ist der Wissokaja Gora bei Nischne Tagilsk eine löcherige Magneteisenmasse von 1500′ L., 1500′ Br. und 250′ H.; in der Kupferregion am Lake Superior finden sich mehrere tausend Fuß mächtige Magneteisenberge. Doch ist das frisch aus dem Innern gebrochene Erz nur schwach magnetisch, stärker sind die rostigen Randstücke.

450

Wirkung zweier Magnete auf einander (Georg Hartmann zu Nürnberg 1543). Da sich der eine Pol eines M. immer wieder nach Norden richtet, wenn man ihn auch nach Süden dreht, und ebenso der andere immer wieder nach Süden, wenn man ihn auch nördlich stellt, so muß schon die Vermuthung entstehen, daß in den beiden Hälften des M. eine Verschiedenheit stattfinde, obwohl dieselben das Eisen in ganz gleicher Weise anziehen und festhalten. Um diese Verschiedenheit zu finden, läßt man zwei M. auf einander wirken, z. B. zwei auf Spitzen horizontal schwebende Nadeln, sogenannte Declinationsnadeln. Man bemerkt dann, daß die Nordpole der beiden Nadeln sich von einander entfernen, daß ebenso die beiden Südpole von einander weichen, daß dagegen der Nordpol der einen und der Südpol der anderen Nadel sich einander nähern und dann einander mit einer gewissen Kraft festhalten. Hieraus folgt das magnetische Grundgesetz: *Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an.* Man nennt daher die gleichnamigen Pole auch feindliche, die ungleichnamigen aber freundliche.

Diese Wirkung findet indeß nicht blos an den Polen, sondern an allen Stellen eines M. statt: Jede Stelle der Nordhälfte eines M. stößt jede Stelle der Nordhälfte eines anderen M. ab, und jede Stelle der Südhälfte eines M. stößt jede Stelle der Südhälfte eines anderen M. ab. Aber jede Stelle der Nordhälfte eines M. zieht jede Stelle der Südhälfte eines anderen M. an. Was also die Nordhälfte eines M. abstößt, nämlich die Nordhälfte eines anderen M., das

zieht die Südhälfte des ersten M. an; und was die Südhälfte eines M. abstößt, nämlich die Südhälfte eines anderen M., das zieht die Nordhälfte des ersten M. an. Beide Hälften des M. enthalten Magnetismus, indem beide Eisen anziehen; aber die Magnetismen der beiden Hälften sind verschieden, ja sogar entgegengesetzt, indem der eine anzieht, was der andere abstößt. Es gibt also zwei einander entgegengesetzte Magnetismen, den Ms. der Nordhälfte, Nordmagnetismus, und den der Südhälfte, Südmagnetismus. Demnach lautet das Grundgesetz allgemeiner: **Gleichnamige Magnetismen stoßen einander ab, ungleichnamige Magnetismen ziehen einander an.**

Man benutzt diese Gesetze, um zu finden, ob und wie ein Körper magnetisch ist: 1. Wenn ein Körper die beiden Pole einer Magnetnadel nicht anzieht und nicht abstößt, so ist er kein M. und auch nicht magnetisch. 2. Wenn ein Körper die beiden Pole einer Magnetnadel anzieht, so ist er kein M. aber magnetisch und zwar paramagnetisch. 3. Wenn ein Körper die beiden Pole einer Magnetnadel abstößt, so ist er kein M. aber magnetisch und zwar diamagnetisch. 4. Wenn ein Körper den einen Pol einer Magnetnadel anzieht und den anderen abstößt, so ist er ein M., und zwar hat er da Nordms., wo er den Nordpol der Nadel abstößt, und da Südms., wo er den Südpol der Nadel abstößt. — Da unsere nördliche Erdhälfte die Nordpole aller frei beweglichen M. anzieht und deren Südpole abstößt, während die südliche Halbkugel umgekehrt wirkt, so folgt daraus, daß die Erde auch ein M. ist, daß sie in der nördlichen Halbkugel Südms. und einen Südpol hat und in der südlichen Halbkugel Nordms. und einen Nordpol. — Als ein vortreffliches Mittel für die feineren magn. Prüfungen empfiehlt Alfred Mayer (1878) magnetisirte Nähnadeln, die in kleinen Korkstöpfeln steckend auf Wasser so schwimmen, daß ihre Spitzen herausragen.

451 **Die magnetische Influenz oder Vertheilung** (Aepinus 1759?). Die magnetische Influenz ist die Erscheinung, daß ein Stück Eisen in der Nähe eines Magnets selbst ein Magnet wird. Sie erklärt sich durch die zwei **Gesetze der Influenz:**

1. **In jedem Eisenkörper sind beide Magnetismen an jeder Stelle in gleicher Menge vorhanden und neutralisiren einander.**

2. **Nähert man einen neutralen Eisenkörper einem Pole, so zieht dieser ungleichnamigen Magnetismus in den zugewandten Theil und stößt gleichnamigen Magnetismus in den abgewandten Theil des Eisenkörpers.**

Induction des ersten Gesetzes. Nähert man einem M. ein Stück Eisen, so wird dasselbe selbst ein M., jedoch ohne seinen Ms. durch Mittheilung zu erhalten. Wenn es seinen Ms. nicht durch Mittheilung erhalten hat, so muß derselbe schon vorher in dem Eisen gewesen sein. Da er jedoch vorher nicht merkbar war, so mußte er aufgehoben sein. Aufgehoben wird aber Ms. nur durch die gleiche Menge des entgegengesetzten Ms.; folglich müssen an jeder Stelle eines Eisenkörpers beide Msn. in gleicher Menge vorhanden sein und sich so neutralisiren.

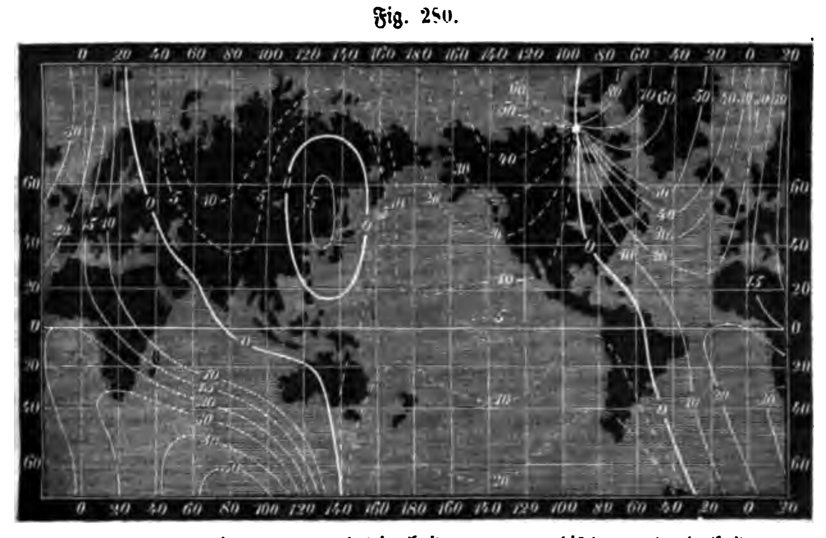
In dieser Schlußkette sind drei Behauptungen oder Prämissen enthalten, welche durch Versuche dargethan werden müssen. Die erste Prämisse ist, daß ein Stück Eisen in der Nähe eines M. selbst ein M. wird. Dies zeigen folgende Versuche: Hängt man an den einen Pol eines M. ein Stück Eisen, so kann man an dieses ein zweites kleineres, an dieses ein drittes, eine Stahlfeder oder ein Drahtstück, an dieses ein viertes, Eisenfeilspäne u. dgl. hängen. Befestigt man in der Nähe des Poles ein Eisenstück, so zieht dieses Eisenfeilspäne oder ein anderes Eisenstück an und hält es fest.

Die zweite Prämisse behauptet, daß das Magnetisiren des Eisens nicht durch Mittheilung geschehen sei. Dafür sprechen folgende 4 Gründe: 1. Wäre es Mittheilung, so müßte der M. bei jedem Versuche von seiner Kraft verlieren; da er jedoch bei beliebig wiederholten Versuchen seine Stärke unverändert beibehält, so ist es keine Mittheilung. 2. Wäre es Mittheilung, so dürfte das Magnetisiren nur bei der Berührung stattfinden; da es jedoch auch schon bei bloser Annäherung geschieht, so ist es keine Mittheilung. 3. Wäre es Mittheilung, so müßte das Eisen nach seiner Entfernung ebenfalls noch ein M. sein; da es jedoch nach seiner Entfernung kein M. mehr ist, so ist das Magnetisiren keine Mittheilung gewesen. 4. Wäre es Mittheilung, so müßte ein Stück Eisen, das am Nordpole hängt, nur Nordms. enthalten; da es jedoch gerade am zugewandten Ende Südms. enthält, und am

lesen ist, läßt sich die Declination auf Min. und Sec. genau berechnen. — Der Lamont'sche Reisetheodolit enthält auf einer messingenen Bodenplatte einen getheilten Silberkreis in einer zweiten durchbohrten Messingscheibe, durch welche ein drehbarer Zapfen geht, der einen dritten Messingkreis trägt; auf einer seitlichen Verlängerung desselben ist das Fernrohr in einer Verticalebene drehbar angebracht, so daß seine Achsenverlängerung die Achse des ganzen Apparates schneidet; der bis jetzt beschriebene Theil des Apparates wird zuerst aufgestellt, und die Achse des Fernrohres in den geogr. Meridian gebracht. Dann wird auf die oberste Platte das Magnetgehäuse gestellt und zwar so, daß die zweimal durchbrochenen Seiten des unteren, rechteckigen Messingkastens auf der Achse des Fernrohres senkrecht stehen, und daß die Achse des oberen röhrenförmigen Theiles, in welchen der Coconaufhängefaden des Magnetstabes hängt, in die Achse der unteren Theile des Apparates fällt. Die obere Durchbrechung dient zur Aufnahme des Magnetstabes und ist außen durch Glasgehäuse umschlossen, die untere Durchbrechung fällt in die Verlängerung des Fernrohres und enthält einen mit dem Magnetstabe senkrecht fest verbundenen Spiegel. Statt des Fadenkreuzes ist in dem Fernrohre eine mit zwei auf einander senkrechten Linien versehene Glasplatte eingesetzt, deren Spiegelbild man durch das Fernrohr in dem Magnetspiegel sehen kann. Man dreht nach der Aufstellung des Magnetgehäuses die dritte Platte so lange, bis das Linienkreuz sein Spiegelbild deckt; dann ist das Fernrohr dem Magnet parallel, im magnetischen Meridian; die an dem getheilten Kreise abzulesende Drehung ist die Declination.

457 Die Declination ist zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten an einem Orte verschieden. Doch gibt es Orte gleicher Declination; Linien, welche Orte gleicher Declination verbinden, werden isogonische Linien genannt (s. Fig. 280). Diese Linien gehen im

Fig. 280.



Allgemeinen nordsüdlich, und durch die beiden geographischen und die beiden magnetischen Erdpole. Die Linie, auf welcher die Declination = Null ist, wo also die Nadeln direct nach Norden zeigen, heißt Agone. Die Veränderungen der Declination nach der Zeit nennt man Variationen; man unterscheidet säculare, jährliche und tägliche Variationen, sowie unregelmäßige Variationen, Störungen oder Perturbationen; die letzteren treten gewöhnlich zusammen auf mit Nordlichtern und stehen in einem noch unerklärten Zusammenhange mit den Sonnenflecken. Die Häufigkeit der Störungen, die Häufigkeit der Nordlichter und die Zahl der Sonnenflecken erreichen nämlich nach je 11 Jahren ein Maximum und in der Zwischenzeit ein Minimum, und die Maximalzeiten der drei Erscheinungen fallen zusammen; so waren 1837, 1848, 1860, 1870 Maximalzeiten der Perturbationen, der Nordlichter und der Sonnenflecken. (Näheres 564, Beschreibung der Sonne).

dies um so mehr, je näher sie an der Indifferenzzone ist. 4. **Das struppige Aussehen** eines mit Eisenspänen bestreuten M. Jedes Eisentheilchen, das an der Nordhälfte hängt, hat am zugewandten Ende einen Südpol und am abgewandten Ende einen Nordpol; alle diese Nordpole stoßen einander ab und entfernen sich daher sparrig voneinander. 5. **Die Platonische Kette** und die Platonische Brücke, Fig. 277. In Platons Dialog Jon ist schon erwähnt, daß man an einen M. eine Kette von Ringen hängen kann. Nach der Influenz hat der erste Ring am Nordpol in der abgewandten Hälfte Nordm.; dieser influenzirt den folgenden Ring, so daß dieser und alle folgenden in den abgewandten Hälften Nordms. haben, während in den Ringen am Südpole die abgewandten Hälften Südm. besitzen; hängen solche Ketten an den beiden Polen eines Hufeisenmagn., so ziehen daher die abgewandten Hälften der untersten Ringe einander an und bilden eine Bogenbrücke; besteht dieselbe aus Eisenfeilspänen, so läßt sie sich anzünden und verglimmt durch und durch. 6. **Die magnetischen Kraftlinien** entstehen, wenn auf einen Magnetstab oder auf die nach oben gerichteten Pole eines Hufeisenmagn. eine Papier- oder Glastafel gelegt und diese mit Eisenspänen bestreut wird; von den Polen nach außen ordnen sich die Eisentheilchen in strahlenartig stehenden geraden Linien, zwischen den beiden Hälften ziehen sie in elliptischen Curven zu einander (Fig. 278). Man kann diese Curven wie die Platonische Brücke erklären; da jedoch Theile derselben auch entstehen, wenn nur an einer Stelle z. B. bei 0 Feilspäne liegen, so muß man sie der directen Influenz des M. zuschreiben. Jedes Eisentheilchen innerhalb der Grenzen der Wirkungssphäre des M., die man das magnetische Feld nennt, wird ein M. Die 2 Pole dieses kleinen temporären M. werden von dem einen oder beiden Polen des M. angezogen oder abgestoßen. Ist das Eisentheilchen im Verhältnisse zu seiner Entf. von dem Magnetstabe sehr klein und befindet es sich viel näher an dem einen als an dem anderen Stabpole, so sind seine beiden Pole von diesem Stabpole gleichweit entfernt, erfahren also von diesem gleiche aber entgegengesetzte Wirkungen. Auf das Eisentheilchen wirkt ein Kräftepaar (Aufg. 162), das keine fortschreitende, wohl aber eine drehende Bewegung hervorbringt, und das Theilchen so lange ablenkt, bis seine Achsenrichtung in die des Kräftepaares fällt; daher gehen die Kraftlinien in der Stabrichtung geradlinig nach außen und bilden Str. um den Pol. Ist dagegen der Unterschied zwischen den Entf. von den beiden Stabpolen gering, so wirkt auch von dem anderen Pole her ein Kräftepaar auf das Eisentheilchen und lenkt es in die Richtung der Resultante der beiden Paare, dreht es also um so mehr von der Richtung nach dem ersten Pole ab, je näher es dem zweiten kommt; darum biegen sich die Kraftlinien zwischen den Polen von der geraden Richtung nach dem einen Pole weg und krümmen sich nach dem anderen Pole zu, wodurch sie wie die Theilchen selbst in der Mitte zwischen beiden Polen der Stabrichtung parallel werden. Ganz in demselben Verhältnisse befinden sich frei aufgehängte Magnete und Nadeln auf der Erde, sie neigen sich entweder ganz einem Pole zu oder nehmen die Resultantenrichtung der beiden Paare an.

Fig. 277.

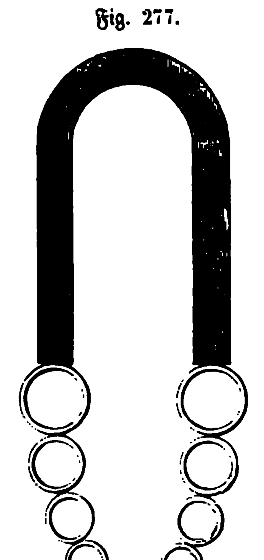


Fig. 278.

Der Raum um einen Magnet, auf den sich dessen Wirkung erstreckt, heißt **das magnetische Feld**; die **Kraftlinien** des magnetischen Feldes geben die Richtungen der Resultanten an. In einem gleichmäßigen magnetischen Felde sind

die Kraftlinien parallel, z. B. in einem kleinen Raumtheile nicht zu nahe bei einem Magnet oder in einem größeren Raume auf der Erde. Da ein elektrischer Strom Magnetismus erzeugt und eine kräftige Stromspule besonders starken Magnetismus, so haben auch ein elektr. Strom und eine Stromspule ein magnetisches Feld.

Zu den Influenzversuchen muß man möglichst reines, weiches Schmiedeeisen verwenden, während die permanenten M. aus Stahl bestehen. Nur Schmiedeeisen wird in der Nähe des M. rasch und stark ein M., nur Schmiedeeisen ist nach seiner Entf. sogleich kein M. mehr; jedoch bleiben Spuren von Ms. für immer in demselben zurück. Im Schmiedeeisen fließen also die beiden Fluida leicht auseinander; ebenso setzt es dem Wiederzusammenfließen einen sehr geringen Widerstand entgegen, es hat, wie man sich ausdrückt, eine sehr kleine Coërcitivkraft. Im Stahl fließen die Fluida schwer auseinander; man muß dafür besondere Methoden anwenden; ebenso setzt er dem Wiederzusammenfließen einen großen Widerstand entgegen, er hat eine große Coërcitivkraft. Diese Vorstellung von einer Coërcitivkraft ist nur ein Nothbehelf für unsere unvollkommene Einsicht in die Sachlage. Wie A. L. Holz (1878) neuerdings nachgewiesen hat, ist die Vorstellung ganz unhaltbar; denn nach seinen Versuchen kann Magneteisenstein ein viel stärkerer M. werden als Stahl, müßte also auch eine größere Coërcitivkraft haben, während er doch durch eine geringere Kraft als Stahl magnetisirt und entmagnetisirt werden kann.

Der Magnetismus eines Stahlstabes, der demselben, wenn auch nicht ganz ungeschwächt, viele Jahre verbleibt, heißt der **permanente** Magnetismus; der Magnetismus von Schmiedeeisen, der nach Entfernung der erzeugenden Kraft wieder verschwindet, heißt **temporärer** Magnetismus. Die Spuren von Magnetismus, die im magnetisirten Schmiedeeisen für immer zurückbleiben, heißen das **magnetische Residuum**, oft auch **remanenter** Magnetismus. Jedoch versteht man hierunter gewöhnlich einen Theil des temporären Ms., der unter gewissen Umständen noch zurückbleibt und nach Beseitigung derselben schwindet.

Wenn ein Stück Schmiedeeisen sich in der Nähe eines M. befindet, so wird es selbst ein M., dessen Pole unter gewöhnlichen Umständen an den Enden und dessen Indifferenzzone in der Mitte liegt. Wenn jedoch das Schmiedeeisen einen Pol eines starken M. direct berührt, so fließt aller entgegengesetzte Ms. in die Berührungsfläche; dieser und der Polms. heben sich gegenseitig auf, so daß von dieser Stelle her kein mag. Feld mehr vorhanden ist. Der gleichnamige abgestoßene Ms. des Schmiedeeisens beginnt dagegen gleich hinter der Berührungsfläche und ist über die ganze Länge des Schmiedeeisens ausgebreitet (Jamin 1873). **Ein schmiedeeiserner Ansatz eines Stahlpoles** erscheint demnach wie eine Fortsetzung des Poles, **er enthält den Ms. des Poles**, jedoch mit dem Vorzuge **leichter Beweglichkeit des Ms.**

Der temporäre Ms. des Schmiedeeisens wächst, wie schon Coulomb u. a. ältere Physiker fanden, bei kleinen magnetisirenden Kräften stärker als diese, bei großen aber schwächer als diese, und dieses Gesetz gilt in höherem Maße bei gestreckteren und weniger dichten Stäben, als bei gedrungeneren und dichteren; die ersteren erreichen mit kleineren Kräften mehr Ms. und sind eher gesättigt als die letzteren (Börnstein 1875). Der temp. Ms. von Ni und Co ist bei sehr schwachen Influenzen fast dem des Eisens gleich, nimmt aber bei stärkeren Kräften ab und ist im Minimum 0,4 von dem des Eisens; bei noch stärkeren nimmt er wieder zu und kann bis zu 0,75 steigen, worauf er abermals abnimmt, so daß bei den stärksten Influenzen das Nickel und Cobalt 5mal schwächer als Eisen bleiben.

Die Vorstellung, der Ms. bestände aus zwei Fluiden, die im Nichtm. vereinigt, im M. dagegen von einander geschieden seien, **die Theorie der Fluida**, ist wohl zulässig, weil sie die Erscheinungen unter einen Gesichtspunkt bringt, hat aber hierdurch nicht die Berechtigung, für Wahrheit zu gelten. Wegen ihrer Einfachheit wird sie indeß immer noch angewendet, obwohl ihr eine Erscheinung widerspricht, die für einen ganzen M. die Wahrheit jener Vorstellung absolut aufhebt und ihr höchstens für die kleinsten Theilchen, die Moleküle, Gültigkeit beläßt; diese Erscheinung hat außerdem eine andere Vorstellung, die wir mit jener Erscheinung nun betrachten wollen, sehr nahe gelegt, nämlich die **Theorie der Molekularmagnete.**

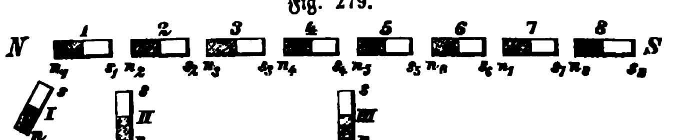
452 **Die Constitution der Magnete** (Coulomb 1779). Zerbricht man eine magnetisirte Stricknadel in zwei Stücke, so ist jedes Stück ein Magnet mit einem Nord- und einem Südpole; das eine Stück hat an der Bruchstelle, wo vorher die Indifferenzzone war, einen Nordpol, das andere einen Südpol, die beiden früheren Endpole bleiben ungeändert. Denselben Versuch kann man beliebig oft wiederholen;

man erhält immer kleinere und immer schwächere Magnete, aber doch immer vollständige Magnete mit zwei Polen. Daraus folgt, daß auch die kleinsten Theile eines Magnetes, die Moleküle selbst, Magnete sind, die man Molekularmagnete nennt. Da bei dem Zerbrechen immer die nach dem ersten Nordpole hin gerichteten Bruchstellen Nordpole sind und die entgegengesetzten Südpole, so folgt weiter, daß die Nordenden der Molekularmagnete eines Magnetstabes nach dem Nordpole, die Südenden nach dem Südpole des Magnetstabes zu liegen.

Von der Richtigkeit der angegebenen magnetischen Constitution überzeugt ein Versuch: Man füllt eine Glasröhre mit reiner Schmiedeeisenfeile, verschließt sie mit Korken und magnetisirt sie nach den sogleich anzugebenden Methoden. Schüttelt man sie, so verliert sie ihren Ms., weil nun die einzelnen magnetisch gewordenen Theilchen ihre Pole nicht mehr in der gleichen, sondern in verschiedenen Lagen haben.

Auch mit dieser Theorie der Molekularmagnete erklären sich leicht sämmtliche magn. Erscheinungen, ja sogar solche, die sich durch die Influenz nicht erklären, wie die Lage der Pole (4.) und der van Rees'sche Satz. 1. Die Anziehung. Wird ein Stück Eisen dem einen Ende z. B. dem Ende genähert, nach welchem sämmtliche Nordenden der Mol gerichtet sind, so ist es allen diesen Nordenden näher als den Südenden; folglich wird sein Südmagn. in sein genähertes Ende gezogen, und dieser Südms. wird nun von allen Nordenden stärker angezogen als von den zugehörigen Südenden abgestoßen, weil er den ersteren näher ist als den letzteren; es bleibt daher Anziehung übrig. 2. Die Indifferenzzone. An der Mitte eines M. (Fig. 279) ist ein Stück Eisen III immer gleich weit von dem Nordende eines Mol. und dem Südende eines anderen entfernt, weßhalb die Einwirkungen sich aufheben. 3. Die Abnahme der Anziehung von den Enden nach der Mitte zu. Ein Eisenstück II, das in irgend eine Gegend zwischen das Ende und die Mitte eines M. gebracht wird, hat zu seinen beiden Seiten Theilchen von entgegengesetzter und daher neutralisirter Wirkung; nur die entfernteren Mol., die nicht zu den beiderseits gleich gegen das Eisenstück gelagerten gehören, können noch anziehend wirken; daher ist die Anziehung geringer.

Fig. 279.



4. Die Lage der Pole etwas abwärts von den Enden. Ein Eisenstück I wird nicht blos von dem Ende N, in dessen Nähe es sich befindet, sondern von allen Mol. des ganzen M. angezogen, aber von diesen mit stark abnehmender Kraft; würde es von dem Ende allein angezogen, so würde es sich nach dem Ende hinbewegen, dieses Ende N würde der Pol sein; da es aber auch nach den übrigen Theilen, aber mit geringerer Stärke hingezogen wird, so muß es die Richtung der Resultante einschlagen, die nach einem etwas vom Ende abliegenden Punkte hingeht; dorthin bewegen sich also die meisten Eisentheile, dort ist der Pol. 5. Das Magnetisiren besteht darin, daß die Molekularmagn. so lange gedreht werden, bis ihre Nordpole nach der einen, ihre Südpole nach der entgegengesetzten Seite gerichtet sind. 6. Die Coërcitivkraft ist der Widerstand, den die Molekularmagnete ihrer Drehung entgegenstellen: kehren die Mol. von selbst wieder in die frühere Lage zurück, so ist der Körper temporär magnetisch; verharren sie in der parallelen Lage, so ist der Körper permanent magnetisch. 7. Der Unterschied zwischen para- und diamagnetischen Körpern beruht darin, daß die ersteren die Pole ihrer Molekularmagn. nach dem ungleichnamigen, die letzteren nach dem gleichnamigen Pole hin richten. 8. Der van Rees'sche Satz (1847): Wäre (Fig. 279) der Nordpol n_2 so stark wie der Südpol s_1, so würden sich die beiden aufheben; da jedoch an dieser Stelle, wie in der ganzen Nordhälfte, der Nordms. überwiegend ist, so muß n_2 stärker als s_1, also auch stärker als n_1 sein; aus demselben Grunde ist n_3 stärker als n_2 u. s. w. Die innere magn. Kraft nimmt also nach der Indifferenzzone hin zu. Davon überzeugt folgender Versuch: Zerbricht man eine stark magnetisirte Stricknadel in kleine Stückchen, so bleiben an den Mittelstückchen mehr Feilspäne hängen als an den Endstückchen. Der hierin liegende scheinbare Widerspruch mit der Abnahme der Anziehung nach der Mitte zu löst sich in dem van Rees'schen Satze: Die innere magn. Kraft wächst von den Polen bis zur Indifferenzzone und ist in dieser am größten; die Wirkung nach außen aber wächst von der Indifferenzzone bis zu den Polen und ist in diesen am größten.

Es wird sich später zeigen, daß man von einer eigenen magn. Kraft der Mol., von einer Scheidung derselben in zwei Arten und einer Vertheilung der zwei Arten auf die bei-

en Hälften der Mol. ganz absehen kann; nach Ampères Theorie besteht der Ms. darin, aß die Mol. von el. Strömen umkreist sind, und die Magnetisirung hat nur die Aufgabe, iese el. Ströme einander parallel und gleich gerichtet zu machen.

Die Erzeugung des Magnetismus. Bei der Erzeugung des Magnetismus 453 nuß die Entstehung des temporären oder vorübergehenden Magnetismus von er des permanenten oder dauernden Magnetismus unterschieden werden. Im Schmiedeeisen entsteht fast nur temporärer Magnetismus; im Stahl dagegen entteht temporärer und permanenter Magnetismus. Die Magnetisirung von Eisen ınd Stahl kann geschehen sowohl durch Annäherung oder Berührung, als insesondere durch Streichen mit oder an permanenten oder temporären Magneten; ie kann jedoch auch geschehen durch vielfaches Herumführen eines elektrischen Stromes um Eisen= oder Stahlstäbe. Von besonderer Wichtigkeit ist die Erzeugung der Hufeisenmagnete, da die beiden Pole derselben gewöhnlich an den neben einander iegenden Enden der zwei Schenkel sich befinden und daher leicht zur Zusammenwirkung ebracht werden können. Wir betrachten zuerst das Bestreichen von Stahlstäben mit ermanenten Magneten, die älteste Methode, welche die Bezeichnung Strich führt.

Beim einfachen Strich (Gilbert 1633 de magnete) setzt man den einen Pol eines M. auf die Mitte des zu magnetisirenden Stabes, streicht nach dem einen Ende hin, hebt ort hoch auf, geht in der Höhe wieder bis zur Mitte, setzt dort abermals auf und streicht vieder bis zum Ende; dasselbe wiederholt man oftmals, und verfährt dann mit der anderen Hälfte des Stabes in gleicher Weise, aber mit dem anderen Magnetpole. Nach der Theorie er Fluida zieht man hierbei mit dem Streichpol das entgegengesetzte Fluidum in den betrichenen Theil und stößt das gleichnamige in den anderen Theil. Nach der Theorie der Molekularm. besteht die Wirkung darin, daß man die dem aufgesetzten Pole ungleichnamigen Pole der Molekularm. auf die Seite dreht, nach welcher hin der Strich geschieht, und daß ie gleichnamigen Pole nach der entgegengesetzten Seite gedreht werden; so erhält das Ende, n welchem der Strich aufhört, immer den entgegengesetzten Pol des Streichpoles. Statt ie beiden Pole eines Stabes nacheinander anzuwenden, kann man auch die entgegengesetzten Pole zweier Stäbe zugleich benutzen; man setzt sie öfter in der Mitte auf und fährt nach eiden Seiten hin, die dann zu den streichenden Polen ungleichnamige Pole erhalten; diese Methode nennt man den getrennten Strich.

Beim Doppelstrich (Michell und Aepinus 1760?) setzt man die entgegengesetzten Pole zweier M. (unter Benutzung eines Holzbreiecks) unter Winkeln von 20° auf die Mitte es zu magnetisirenden Stabes, und streicht in derselben Lage gleichzeitig mit beiden Stäben orwärts bis zum einen Ende, dann zurück über den ganzen Stab bis zum anderen Ende, ann wieder vorwärts über den ganzen Stab bis zum ersten Ende, wiederholt dies öfter, ınd hebt endlich in der Mitte ab. Statt die entgegengesetzten Pole zweier M. zu benutzen, ann man auch einen hufeisenförmig gebogenen Magnetstab in derselben Weise anwenen, da diese Form den Vortheil hat, daß die beiden Pole nahe beisammen sind. Hierbei oird auf die Mol. des Stabes, die zwischen den beiden Streichpolen liegen, immer so einewirkt, daß sie ihre Nordpole nach dem streichenden Südpole und ihre Südpole nach dem treichenden Nordpole richten, worin die beiden Streichpole durch Anziehung und Abstoßung ich unterstützen; auch hier erhält wieder das Ende, das immer vom Nordpole berührt wird, inen Südpol und umgekehrt. Beide Methoden, der einfache wie der Doppelstrich werden enau in derselben Weise bei der Erregung von Hufeisenm. angewendet; am bequemsten ist ierbei ein Hufeisenm. von gleicher Schenkelbreite, den man senkrecht auf das horizontal ingelegte Hufeisen setzt und entweder vom Scheitel nach den Enden oder umgekehrt fährt Hoffert). Die Wirkungen sind nach dem van Rees'schen Satze kräftiger, wenn man den Stab zu dem mittleren Theile anderer Stäbe oder M. macht oder ihn auf die entgegenesetzten Pole zweier M. legt; auch wird die Wirkung dadurch verstärkt, daß man alle Seiten ines Stabes bestreicht.

Der Kreisstrich besteht darin, daß man 4 Stahlstäbe, von denen 2 schon M. sein innen, zu einem Rechtecke legt, oder zwei Hufeisen mit ihren Enden an einander bringt, der vor die Enden eines Hufeisens einen Anker, d. i. eine Platte von weichem Eisen legt nd dann mit einem Pole eines Stabes an irgend einer Stelle senkrecht aufsetzt, öfter die eschlossenen Räume ganz durchstreicht und an der Anfangsstelle wieder aufhebt. Es ist ffenbar, daß der Pol sämmtliche gleichn. Molekülpole von sich ab und sämmtliche ungleichn. ach sich hin wendet, daß also das bestrichene Hufeisen da, wo der Pol heraustritt, einen ngleichn., und da, wo er wieder in das Hufeisen eintritt, einen gleichn. Pol erhält. Nach

Dove liefert der Kreisstrich die besten Resultate, weil hierbei die vorgelegten Anker und Hufeisen ebenfalls M. mit entgegengesetzten Polen werden und dadurch vertheilend wirken.

Daß durch bloße Annäherung und durch Berührung eines starken M. ebenfalls M. entsteht, und zwar sowohl temporärer wie permanenter, ist schon in 451. gezeigt worden. Die stärksten temporären M. entstehen, wenn um ein großes, weiches Hufeisen Kupferdrähte gewunden sind und durch diese ein el. Strom geht. Diese nur für die Zeit des Stromlaufes dauernden M. heißen **Elektromagnete** (525.); sie dienen zur Erzeugung permanenter M., indem man Stahlstäbe an denselben streicht. Jedoch können auch permanente M. durch el. Ströme entstehen, wenn dieselben nämlich um Stahlstäbe kreisen; man windet z. B. einen Kupferdraht vielfach um eine Hülse, läßt durch den Draht einen Strom gehen, und führt den Stab öfter durch diese Spule oder bewegt die Spule öfter über den in ihr steckenden Stab hin und her; auch das ruhige Verweilen eines Stabes in einer Stromspule erzeugt permanenten Ms.

Die Stärke oder Intensität des permanenten Magnetismus eines Stahlstabes ist abhängig von der Größe der magnetisirenden Kraft, von der Anzahl der Striche oder Spulbewegungen, von den Dimensionen und der Gestalt des Stabes, von der Härte und dem Kohlenstoffgehalt des Stahles, ja sogar von der Härtungsweise des Stahles. Der Magnetismus dringt nicht tief in die Stäbe ein, in die härtesten und kohlenreichsten Stäbe noch nicht 0,1mm tief; darum können dünne Lamellen ebensostark magnetisirt werden als dicke Stäbe. Die Lamellen haben den Vorzug, daß man eine größere Anzahl aufeinander legen kann; durch das Aufeinanderlegen erhält man starke Magnete, sogenannte magnetische Magazine; jedoch ist die Wirkung der Summe bedeutend kleiner als die Summe der Wirkungen, die Einzelstäbe schwächen sich also gegenseitig, und zwar um so mehr, je größer ihre Zahl ist; deßhalb bewirkt bei einer gewissen Anzahl von Einzelstäben weiteres Zulegen keine Verstärkung mehr.

Im Allgemeinen steigt der Ms. eines Stabes mit der Zahl der Striche; jedoch erreicht derselbe bald eine gewisse Grenze, über welche hinaus weiteres Streichen nicht mehr wirkt. Der nun erreichte Ms. verharrt jedoch nicht, der temporäre schwindet, der permanente bleibt; der Stab hat mit diesem Streichstab die **magnetische Sättigung** erreicht. Ein stärkerer Streichstab vermag noch höhere Grade der Sättigung zu erzielen; jedoch wird bald ein **Maximum der Sättigung** erreicht, das mit dem stärksten Streichstabe nicht mehr überschritten wird. Beim Streichen wächst der Ms. anfänglich am stärksten, später immer weniger, so daß oft wenige Striche ebensoviel wirken, wie eine große Zahl.

Der Einfluß von Härte und Kohlengehalt ist sehr verwickelt, gehört jedoch zusammen; kohlenstoffreiche Stahle nehmen nach Jamin (1873), wenn sie durch jähes Abschrecken sehr hart geworden sind, sehr wenig perm. Ms. an, jedoch etwas mehr, wenn sie durch Anlassen geringere Härte haben; arme und mittlere Stahle dagegen nehmen am meisten perm. Ms. an, wenn sie durch Abschrecken die größte Härte erhalten, jedoch weniger, wenn sie durch Anlassen weicher wurden. Hieraus erklärt es sich, warum es keine bestimmten Regeln zur Herstellung bester M. gibt; jeder andere Stahl muß je nach seinem Kohlengehalte in anderer Weise abgeschreckt und angelassen werden, um das Max. zu erreichen.

Holtz (1874) und Jamin (1875) fanden durch Abätzen der äußeren Schichten mittelst Salzsäure oder Schwefelsäure, daß der Ms. tiefer eindringe, als man bisher angenommen hatte. In weiche Stahlsorten dringt er am tiefsten ein und zwar um so tiefer, je stärker die magnetisirende Kraft ist; die Tiefe nimmt ab, wie Härte und Kohlengehalt zunehmen, und in die härtesten und reichsten Stahle dringt der Ms. kaum 0,1mm ein; in der Tiefe ist der Ms. ebenso stark als an der Oberfläche. Da jedoch die Tiefe des Eindringens immer nur gering ist, so können Lamellen so stark wie dicke Stäbe werden, und durch Zusammenlegen solcher Lamellen entstehen die stärksten perm. M. Ein solcher Jamin'scher Lamellenmagnet ist in Grammes magnet.-elektrischer Masch. abgebildet; Jamin legte (1873) der franz. Akademie einen solchen M. aus 45 Lamellen vor, der 500kg tragen konnte, das 16fache seines eigenen Gewichtes. Daß die aufeinander gelegten M. sich gegenseitig schwächen, ist leicht erklärlich: jeder Pol ruft in dem benachbarten durch Influenz einen entgegengesetzten Pol hervor, der jenen theilweise neutralisirt; dieser influenzirte Pol ist um so stärker, je mehr M. schon zusammengelegt sind; wird er endlich so stark, wie der Pol eines neu zugelegten Stabes, so wirkt das Zulegen nicht mehr. Als Jamin 6 Stäbe von je 18kg Tragkraft aufeinanderlegte, hatte die Verbindung nur eine Tragkraft von 64kg und jeder einzelne M. nach dem Auseinandernehmen nur 9—10kg.

Jamin benutzte die Sätze über das Eindringen zur Erklärung der **Wiedemann**'schen

Neutralität (1872). W. hatte nämlich beobachtet, daß ein magnetisirter Stab durch eine kleinere Kraft entmagnetisirt werden könne, vorausgesetzt, daß diese überall entgegengesetzten Ms. erzeuge. Wenn nun ein solcher Stab wirklich neutral geworden wäre, so mußte er sowohl den ursprünglichen, als auch den entgegengesetzten Ms. wieder anzunehmen im Stande sein, und zwar durch jede beliebig kleinere Kraft. Jamin fand jedoch, daß ein solcher Stab zwar den ursprünglichen durch eine kleinere Kraft wieder annehme, nicht aber den entgegengesetzten. Dieses sonderbare Verhalten erklärte Jamin durch seine Gesetze des Eindringens: Der von der stärkeren Kraft erweckte ursprüngliche Ms. bringe tief in den M. ein, der von der schwächeren Kraft erzeugte entgegengesetzte Ms. dagegen nicht tief; auf dem Raume seines Eindringens neutralisire er den entgegengesetzten Ms., bleibe aber, wenn die schwächere Kraft lange genug gewirkt habe, in der oberen Schicht nach der Neutralisirung auch noch vorhanden. Demnach liegen in einem solchen Stabe 2 entgegengesetzte magnetische Schichten übereinander, die sich in ihrer Wirkung nach außen aufheben und so den Stab scheinbar neutralisiren. Eine neue entgegengesetzte Magnetisirung durch eine abermals geringere Kraft vermag die obere Schicht nicht zu ändern, hebt also die Neutralität nicht auf; eine neue ursprüngliche Magnetisirung neutralisirt dagegen die obere Schicht und bringt daher den ursprünglichen Ms. der tieferen Schicht wieder zur Wirksamkeit. Daß wirklich die 2 verschiedenen magn. Schichten übereinander liegen, hat Jamin durch das Abätzen der oberen entgegengesetzten Schicht nachgewiesen, indem nach deren Beseitigung der ursprüngliche Ms. wieder hervortrat.

Das Uebereinanderliegen magnetischer Schichten gab Jamin (1875) die Möglichkeit der Erzeugung abnormer Magnete. Ein M., der in den äußeren Schichten starken Ms. enthielt, in den mittleren aber entgegengesetzten und schwächeren, hatte durch die stärkere Wirkung der äußeren Schichten einen gewöhnlichen Süd- und Nordpol; nun wurde die Südhälfte in Säure getaucht; dann lösten sich die äußeren Südschichten auf und es kam der Nordms. der inneren Schichten zum Vorschein; folglich hatte schließlich dieser M. an beiden Enden einen Nordpol. Ein anderer M. wurde ebenfalls bis zum Uebergewichte der äußeren Schichten magnetisirt und dann so lange in Säure gelegt, bis an den Kanten und Ecken, wo die Aetzung am stärksten geschieht, der innere Ms. zum Vorschein kam, der hier eine große Spannung hat. Wenn nun ein anderer M. allmälig dem Stabende genähert wurde, so überwogen anfänglich die äußeren Schichten und zogen den M. an; später überwog der entgegengesetzte Ms. der Ecken und stieß denselben ab. Dieser M. wirkte also in größerer Entf. anziehend, in kleinerer abstoßend, wie der von Galilei (1607) beschriebene, jedoch verloren gegangene magnetische Stein, der in 4″ Entf. anziehend, in 1″ abstoßend wirkte. Eine andere Art abnormer M. hatte Jamin schon 1872 angefertigt; an dem Knie einer fast meterlangen Hufeisenplatte saßen auf den 2 Schenkeln 2 kurze Spulen mit entgegengesetzt gewundenen Drähten, durch welche ein el. Strom ging. Wurden nun die Spulen mehrmals von dem Knie nach den Schenkelenden zu hin und zurück bewegt, so wurde das Hufeisen ein M., hatte jedoch seine Pole nicht an den Enden, sondern an den Stellen, bis zu welchen die Spulen vorangeführt worden waren. Solche abnormen M. waren indeß auch schon der älteren Physik bekannt; werden an einem längeren Stabe verschiedene an einander grenzende Theile mit entgegengesetzten Magnetpolen bestrichen, so werden die Theile auch entgegengesetzt magn. und enthalten mehrere polartige Maximalstellen, sogenannte Folgepunkte, die am besten durch aufgestreute Feilspäne sichtbar werden. Sie entstehen auch, wenn man an das eine Ende eines längeren Stabes einen Magnetpol für kürzere Zeit anlegt. — Duter fand (1877), daß dünne magnetisirte Stahlscheiben einen Pol im Centrum, die Indifferenzzone in einem concentrischen Mittelkreis haben, während der Rand die entgegengesetzte stärkste Polarität besitzt; bei Ringen waren die Maximalstellen die concentrischen inneren und äußeren Ränder.

Auch Nickel und Kobalt lassen sich nach den angegebenen Methoden magnetisiren, jedoch nicht so stark als Eisen. Nach Wild (1877) kann ein Nickelstab $^1/_3$ des perm. Ms. eines gleichen Stahlstabes annehmen, jedoch ist die Permanenz ebenfalls geringer, der langsame Verlust mit der Zeit, durch Temperaturänderungen u. dergl. stärker. Eine besondere Quelle von Magnetismus hat Tommasi (1875) gefunden; eine kupferne Röhre war spiralig um einen Eisencylinder gewunden und von Wasserdampf von hoher Spannung durchströmt; so lange der Strom dauerte, war das Eisen magnetisirt.

Die Tragkraft der Magnete. Unter der Tragkraft eines Magnetes versteht **454** man das Gewicht, das von den Polen durch die Anziehung von berührendem Eisen festgehalten wird. Man findet die obere Grenze der Tragkraft eines Poles, indem man denselben möglichst eben schleift, einen eben geschliffenen Anker mit einer kleinen Wagschale daran hängt und auf die Schale Gewichte bis zum Abreißen legt. Diese Gewichte mit dem der Schale und des Ankers zusammen ver-

doppelt geben die Tragkraft des ganzen Magnetes. 1. Die Tragkraft eines Hufeisenmagnetes ist bedeutend größer als die doppelte Tragkraft eines Poles. 2. Nach Häcker (1844) ist die Tragkraft seiner möglichst gehärteten und möglichst stark magnetisirten Hufeisen $T = a \sqrt[3]{p^2}$, worin p das Gewicht des Hufeisens in kg und a einen constanten Coëfficient = 10,33 bedeutet. In jener Fl. ist das Gesetz enthalten, daß die Tragkraft mit dem Gewichte, aber viel langsamer als dieses steigt. 3. Die Tragkraft eines neuen Magnetes kann durch allmäliges tägliches Zulegen auf das Doppelte steigen, was sich durch die Condensation erklärt; sie sinkt dann durch Abreißen bis zur früheren Stärke herab. 4. Die Tragkraft eines Hufeisensmagazins ist kleiner als die Summe der Tragkräfte der Einzelmagnete. 5. Die Schwächung der Einzelmagnete wird vermindert durch allmälige Abnahme der Länge nach außen, durch Verankerung vor dem Zusammenlegen und durch Armaturen.

1. Die Tragkraft wächst zwar mit der Stärke des M., ist aber kein Maß derselben, weil sie nicht in einfachem Zusammenhange mit derselben steht, nicht, wie man aus der Vertheilung schließen könnte, im directen Verhältnisse zum Quadrat der magn. Anziehung wächst. Wenn nämlich ein M. 3mal stärker wird, so zieht er den vor ihm liegenden Anker 3mal stärker an; er erweckt aber auch in demselben 3mal stärkeren Ms. durch Vertheilung, so daß die 3mal stärkere Anziehung des M. abermals verdreifacht wird, also 3^2mal größer wird. Diese Ableitung setzt voraus, daß die Berührung des Ankers keine Veränderung der magn. Constitution zur Folge habe, eine Voraussetzung, die nicht berechtigt ist. Aus dieser vertheilenden Wirkung folgt indeß leicht der Satz 1.; der Nordpol des Hufeisens zieht Südm. des Ankers an und stößt Nordm. desselben gerade unter den Südpol; genau dieselbe Wirkung auf den Anker hat auch dieser Südpol, die Polarität des Ankers ist daher viel stärker als durch einen Pol allein; folglich ist auch die Anziehung an jedem Pole stärker als an einem Pole allein, die Tragkraft ist daher mehr als die doppelte eines Poles.

2. Nach Häckers Fl. ist $T^3 = a^3p^2$, woraus $T^3/p^3 = a^3/p$ oder $T/p = a \sqrt[3]{p}$, d. h. das Verhältniß der Tragkraft zum Gewichte steht im umgekehrten Verhältnisse zur Kubikwurzel aus dem Gewichte, nimmt also bei zunehmendem Gewichte langsam ab. Bei 1104kg Gewicht ist die Tragkraft gleich demselben; denn ist $T = p$, so ist $p^3 = a^3p^2$, woraus $p = a^3 = 10{,}33^3 = 1104^{kg}$; bei größerem Gewichte ist die Tragkraft kleiner als das Gewicht, bei kleinerem größer. So würde ein Häcker'scher M. von 20^{kg} das 4fache, von 3^{kg} das 7fache, von 1^{kg} das 10fache seines Gewichtes tragen; entsprechend hat Carl kleine M. von wenigen Gr. angefertigt, die mehr als das 100fache ihres Gewichtes trugen. Jedoch ist durch fortschreitend verbesserte Methoden die Häcker'sche Fl. weit überboten worden; schon Elias gab einem Häcker'schen M. von $0{,}657^{kg}$, der nach der Fl. $7{,}807^{kg}$ tragen sollte, eine Tragkraft von 10^{kg}; Logeman fertigte einen M. von $^1/_2{}^{kg}$, der das 31fache trug, während er nach Häckers Fl. nur das 13fache tragen würde; Jamins Lamellenmagn. von 30^{kg} würde nach Häckers Fl. nur das 3fache tragen, trug aber das 16fache.

3. Jamin strich (1872) mit einem weichen Eisen mehrmals von dem Knie eines Hufeisens die Schenkel entlang nach den Polen hin, wodurch die Tragkraft bedeutend verstärkt wurde. In gleicher Weise wirkt der Anker aus weichem Eisen; durch seinen Ms. zieht er den Schenkelms. allmälig in die Pole herab und verdichtet dadurch deren Ms.; diese Condensation erklärt das Zunehmen der Tragkraft bei täglichem Zulegen kleiner Gewichte. Beim Abreißen fließt der condensirte Ms. wieder zurück und die Tragkraft sinkt auf, ja unter die frühere Stärke herab.

4. Daß und warum die Tragkraft eines Magazins kleiner ist als die Summe der Tragkräfte der Einzelmagn., ist schon in 453. erklärt. Am einfachsten ist das Verständniß zu erreichen, wenn man in einer Fig. in den einen Pol richtig stehende und falsch stehende Molekularm. einzeichnet; die richtig stehenden werden durch die benachbarten Pole in falsche Lagen gedreht und die falsch stehenden in ihrer Lage festgehalten.

5. Liegt der aufgelegte Pol etwas weiter zurück als der gleichnamige Pol des unteren M., so werden die richtig stehenden Molekularm. weniger als bei 4. in die falsche Lage gedreht und die falschen werden mehr oder weniger der richtigen Lage genähert, wodurch sich erklärt, daß ein Magazin aus verschieden langen Stäben, deren Pole nach außen zu immer weiter zurückliegen, weniger durch das Zusammenlegen geschwächt wird. Da ein verankerter M. an den verankerten Polen kein magn. Feld mehr hat, so kann er auch nicht schwächend nach außen wirken; werden daher gleich lange Hufeisen zuerst verankert und dann zusammengelegt, so ist die Wirkung der Summe nicht kleiner als die Summe der Wirkungen. Als Jamin (1873) die 6 verankerten M. von je 18^{kg} Tragkraft mit einander verband, hatte

as Magazin sogar eine Tragkraft von 115^{kg}. — Eine ähnliche Verstärkung bewirkte Jamin urch Armaturen, d. i. schwere weiche Eisenplatten, die zwischen die Enden eines Hufeisen-nagazins so eingeschoben wurden, daß sie um gleichviel über die Pole hervorragten; diese ervorragenden Enden wurden dann noch durch Anker verbunden. Als Jamin zwischen die erſten und die 3 letzten der oben genannten 6 M. zwei Armaturen von 1,8^{kg} Gewicht egte und sie durch Anker verband, hatte das Magazin eine augenblickliche Tragkraft von 07^{kg} und nach dem Abreißen des Ankers eine dauernde Tragkraft von 82^{kg}; als schwerere Armaturen, jede von 3^{kg} angebracht wurden, erhob sich sogar die dauernde Kraft auf 93^{kg}. Da auch die Armaturen das magn. Feld aufheben, so ist die Beseitigung der gegenseitigen Schwächung erklärlich. Jamin hält jedoch diese Erklärung nicht für ausreichend und benutzt u eingehender Erklärung die Solenoide, was erst in der Lehre vom Elektromagnetismus erständlich werden kann.

Die anderen Wirkungen des Magnetismus außer der Tragkraft, die Verlängerung der Verkürzung von Eisen- und Stahlstäben, die Aenderung der Leitungsfähigkeit von upferdraht, die Drehung der Polarisationsebene, die Wirkung auf das Licht der Geißler'-chen Röhren und auf dessen Spectrum ſ. 525., 528.

Einfluß anderer Kräfte auf den Magnetismus. a. Mechanische Kräfte. 455 Erschüttert man einen Stab, während er magnetisirt wird, so wird sein Ms. stärker; rschüttert man einen fertigen M., so wird sein Ms. geschwächt. Wird ein M. durch ent-gegengesetztes Magnetisiren entmagnetisirt, so gewinnt er durch Erschüttern einen Theil seines Ms. wieder (Wiedemann 1857). Von besonderem Einflusse ist die Torsion oder Ver-windung eines Magnetstabes auf seinen Ms., wobei die interessante Erscheinung beobachtet wurde, daß der Ms. die Torsion gerade so beeinflußt, wie die Torsion den Ms. So nimmt er permanente Ms. von Stahlstäben durch Torsion ab, und zwar langsamer, als die Torsion wächst; ganz ebenso nimmt die permanente Torsion gedrehter Eisendrähte durch ihre Mag-netisirung ab, und zwar langsamer, als der Ms. wächst. Wiederholte Torsionen in gleichem Sinne vermindern den Ms. kaum noch; eine Torsion im entgegengesetzten Sinne wie die erste bewirkt aber eine neue Verminderung des Ms. Ganz analog vermindern wiederholte Magnetisirungen in gleichem Sinne die Torsion kaum noch; dagegen eine Magnetisirung im entgegengesetzten Sinne wie die erste bewirkt eine neue Verminderung der Torsion. Diese und andere ähnliche von Wiedemann (1859) aufgefundene Erscheinungen weisen darauf hin und erklären sich dadurch, daß die Magnetisirung in einer Drehung der Molekularm. besteht.

b. Die Wärme. Nach älteren Versuchen (Kupfer) nimmt die Magnetisirbarkeit von weichem Eisen bei Erhöhung der Temp. bis zur dunkeln Rothglühhitze zu; Wiedemann hat gezeigt, daß dies bei jeder Temperaturänderung, also auch bei der Abkühlung, aber nur bei der ersten stattfindet; über der dunkeln Rothglühhitze nimmt der temp. Ms. des Eisens ab; auch andere paramagnetische Metalle verlieren in der Hitze ihren temp. Ms., Nickel in sieden-dem Mandelöl, Cobalt in der Weißgluth; bei der Abkühlung kehrt die magn. Eigenschaft wieder, oft in erhöhtem Grade. — Permanente Magnete werden durch Erhöhung der Temp. geschwächt, ja verlieren in einem gewissen Hitzegrade ihren Ms. ganz. Magneteisensteine verlieren ihre Kraft bei der Rothglühhitze, Stahlstäbe schon bei 350°. Die Schwächung durch Erhöhung der Temp. ist theilweise vorübergehend, theils dauernd; der dauernde Ver-lust ist bei der ersten Erwärmung am größten, bei jeder folgenden kleiner und hört endlich ganz auf; der vorübergehende Verlust wird bei jeder Abkühlung ersetzt. Dagegen fand Favé (1876), daß ein bei 350° magnetisirter Stahlstab bei der Abkühlung schwächer wird, bei abermaliger Erwärmung jedoch 3mal so stark, als er bei der Abkühlung war. Gaugain (1877) findet, daß diese Verschiedenheit in dem Unterschied der Temp. (Wiedemann 100, Favé 350°) ihren Grund hat, sowie auch in der Beschaffenheit des Stahls; eine von ihm untersuchte und bei 400° magnetisirte Gußstahlsorte verlor bei der Abkühlung allen Ms., a wechselte sogar bei weiterer Abkühlung die Pole. Der dauernde Verlust durch Erhitzung ist nach Moser und Rieß (1830) größer bei harten Stäben als bei weichen, bei hohlen größer als bei massiven, bei kürzeren größer als bei längeren; er nimmt mit der Dicke des Stabes und mit der Höhe der Temp. zu. Wenn hiernach ein Einfluß der Wärme auf die magn. Erscheinungen unverkennbar ist, so ist auch umgekehrt ein Einfluß des Ms. auf Wärme-verhältnisse zu vermuthen; wirklich hat Tomlinson (1878) gefunden, daß die Wärmeleitung von Stahl und Eisen durch Ms. verändert wird, und Herwig (1878), daß mit der Mag-netisirung eine Wärmeentwickelung verbunden ist.

c. Das Licht. Morichini hatte behauptet, daß eine Stahlnadel magnetisch werde, wenn man ihre eine Hälfte in den blauen oder violetten Theil des Sonnenspectrums bringe, Miß Sommerville gab an, daß dasselbe geschehe, wenn man die eine Hälfte mit blauem Bande umwickele und dem Sonnenschein aussetze. Moser und Rieß zeigten jedoch, daß diese Angaben auf Täuschung beruhen.

d. Chemische Kräfte. Wiedemann 1865—68 untersuchte den Ms. der Salze magn. Stoffe und fand folgende Sätze: der Ms. der Salzlösung ist gleich der Summe der Msn.

faden, Glasfaden oder Haar, so wird das zweite Kügelchen von der Glasstange immer angezogen, wie ein gewöhnlicher Körper, es zieht nie ein drittes Kügelchen an. Die Elektricität geht also nicht durch Seite, Glas, Haare. *Die Körper zerfallen hinsichtlich der Fortpflanzung der Elektricität in Leiter und Nichtleiter, oder besser in gute und schlechte Leiter*, da es absolute Nichtleiter nicht gibt. Die schlechten Leiter nennt man *Isolatoren*, weil ein Körper seine Elektricität behält, wenn er von lauter schlechten Leitern umgeben ist; einen Körper elektrisch isoliren heißt, ihn mit schlechten Leitern umgeben; die guten Leiter nennt man auch *Conductoren*. Nach Wiedemann und Franz (1853) ist die Leitungsfähigkeit der Metalle für Elektricität dieselbe wie für Wärme, jedoch findet nach Arndtsen (1858), sowie nach Matthießen und Vose eine scharf ausgeprägte Veränderlichkeit des el. Leitungsvermögens mit der Temperatur statt, und zwar für die weitaus meisten Metalle in nicht sehr verschiedenem Grade, indem die Leitungsfähigkeit von 0 bis 100° durchschnittlich um 30% abnimmt.

Der wesentliche Unterschied zwischen guten und schlechten Leitern ist folgender: Theilt man einem guten Leiter Elektricität mit, so breitet sie sich über der ganzen Oberfläche aus; berührt man einen elektrischen guten Leiter an einer Stelle, so gibt er seine ganze Elektricität ab. Theilt man einem schlechten Leiter durch Berührung Elektricität mit, so bleibt dieselbe an der Berührungsstelle; berührt man einen elektrischen schlechten Leiter, so verliert er seine Elektricität nur an der Berührungsstelle.

Die besten Leiter sind die Metalle (Silber, Kupfer, Gold, Zink, Platin, Eisen, Zinn, Blei, Quecksilber); dann folgen Kohle, Wasser und alle wässerigen Flüssigkeiten und wässerig feuchten Körper, wie der menschliche, thierische und frische Pflanzenkörper, sowie die feuchte Erde und feuchte Luft. Die besten Nichtleiter sind: Glas, Harz, Seide, Schwefel, trockene Luft, Oele und alle fetten Körper, Alkohol und Aether; Halbleiter sind Steine und trockenes Holz. Nach Sald Effendi (1869) ist, wenn die Leitungsfähigkeit von Wasser = 1000 gesetzt wird, die von Petrol = 72, Schwefelkohlenstoff = 55, Alkohol = 49, Aether = 40, Terpentinöl = 23, Benzol = 16. Feste Nichtleiter werden beim Erhitzen weniger gute Nichtleiter, und wenn sie dem flüssigen Zustande nahe kommen, immer bessere Leiter; umgekehrt ist Eis ein Nichtleiter. Wie überhaupt die Metalle und a. Leiter bei steigender Temp. immer weniger gut leiten, so werden umgekehrt die Metalloide u. a. Nichtleiter bei steigender Temp. immer besser leitend; die Luftarten sind nach Hittorf (1874) bei sehr hoher Temp. und sehr starker Verdünnung ziemlich gute Leiter.

Weil der menschliche Körper ein Leiter ist, die feuchte Erde ebenfalls, und weil die Erde ein unerfüllbares Reservoir für El. ist, so verliert jeder von uns berührte Leiter all seine El., indem sie von dem ganzen Leiter in unsere Hand und in die Erde strömt; daher wird das von uns berührte Kügelchen sofort unelektrisch. Den Glasstab, den wir zum Zwecke der Elektrisirung reiben, können wir in der Hand halten; denn die an anderen Stellen erregte El. geht nicht an die Berührungsstelle. Würde aber ein Metallstab, den wir so reibend festhalten, durch das Reiben el. werden, so würde seine El. in die Erde gehen. Und das ist auch die Ursache, warum Gilbert die Metalle für unel. hielt und die schlechten Leiter für el. Gray zeigte schon das Irrige dieser Benennung: er befestigte einen Metallstab an einem Glasstabe und rieb jenen mit einem Katzenfelle, so zeigte er sich ebenso el. wie ein geriebener Harzstab; die anelektrischen Körper waren gute Leiter, verloren also ihre El. durch die Hand; die idioelektrischen Körper waren dagegen nur schlechte Leiter, deren Reibungsel. an der Entstehungsstelle sitzen blieb. — Leiter, die man elektrisiren will, muß man mit schlechen Leitern umgeben, *isoliren*; die Maschinen zum Elektrisiren haben Füße und Ständer von Glas oder Hartkautschuk; ein Mensch, der elektrisirt werden soll, muß sich auf einen Schemel mit Glasfüßen stellen, auf einen Isolirschemel. Da das Glas indessen leicht eine Wasserhaut anzieht, so gibt man ihm einen Firnißüberzug, und vor dem Gebrauche muß man die Stäbe und Füße durch Erwärmen und Reiben gehörig trocknen. — Wäre die atmosphärische Luft ein guter Leiter, so würde uns wohl die El. ganz unbekannt sein, da jede neu erzeugte El. sofort in die Erde fließen würde; feuchte Luft ist ein schlechter Nichtleiter; daher gelingen viele el. Versuche bei feuchter Luft nicht.

Die *Leitungsfähigkeit des Selens* (Se) gewann ein besonderes Interesse, da dieselbe zur Erfindung des *Photophons* und der *Radiophonie* führte. Willoughby Smith beobachtete zuerst (1873), daß krystallinisches Se durch Beleuchtung eine größere Leitungsfähigkeit erhält, die mit der Lichtstärke wächst. Nach Sale (1873) geschieht die Erhöhung der Leitungsfähigkeit plötzlich, also nicht durch Erwärmung, jedoch durch schwach

en ist, läßt sich die Declination auf Min. und Sec. genau berechnen. — Der Lamont'sche eisetheodolit enthält auf einer messingenen Bodenplatte einen getheilten Silberkreis in ner zweiten durchbohrten Messingscheibe, durch welche ein drehbarer Zapfen geht, der einen itten Messingkreis trägt; auf einer seitlichen Verlängerung desselben ist das Fernrohr in ner Verticalebene drehbar angebracht, so daß seine Achsenverlängerung die Achse des ganzen pparates schneidet; der bis jetzt beschriebene Theil des Apparates wird zuerst aufgestellt, ıd die Achse des Fernrohres in den geogr. Meridian gebracht. Dann wird auf die oberste atte das Magnetgehäuse gestellt und zwar so, daß die zweimal durchbrochenen Seiten des nteren, rechteckigen Messingkastens auf der Achse des Fernrohres senkrecht stehen, und daß : Achse des oberen röhrenförmigen Theiles, in welchen der Coconaufhängefaden des Magtstabes hängt, in die Achse der unteren Theile des Apparates fällt. Die obere Durchechung dient zur Aufnahme des Magnetstabes und ist außen durch Glasgehäuse umschlossen, e untere Durchbrechung fällt in die Verlängerung des Fernrohres und enthält einen mit m Magnetstabe senkrecht fest verbundenen Spiegel. Statt des Fadenkreuzes ist in dem rnrohre eine mit zwei auf einander senkrechten Linien versehene Glasplatte eingesetzt, deren piegelbild man durch das Fernrohr in dem Magnetspiegel sehen kann. Man dreht nach r Aufstellung des Magnetgehäuses die dritte Platte so lange, bis das Linienkreuz sein piegelbild deckt; dann ist das Fernrohr dem Magnet parallel, im magnetischen Meridian; e an dem getheilten Kreise abzulesende Drehung ist die Declination.

457 Die Declination ist zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten nd zu verschiedenen Zeiten an einem Orte verschieden. Doch gibt Orte gleicher Declination; Linien, welche Orte gleicher Declination verbinden, erden isogonische Linien genannt (s. Fig. 280). Diese Linien gehen im

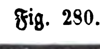
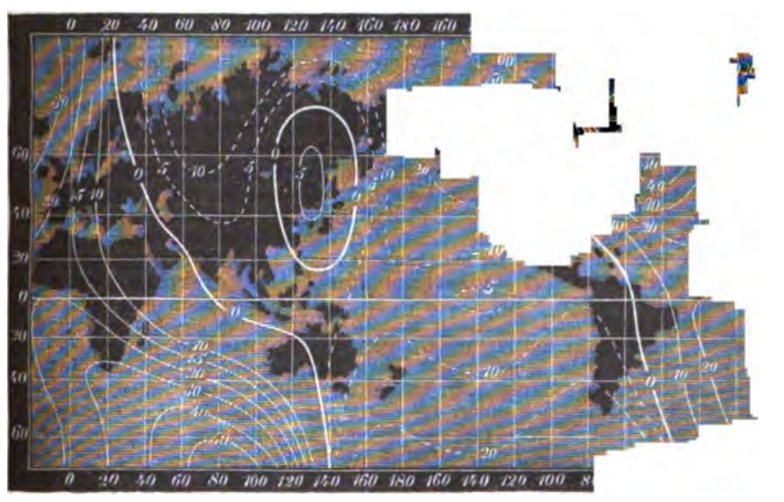


Fig. 280.



llgemeinen nordsüdlich, und durch die beiden geographischen und die beiden magetischen Erdpole. Die Linie, auf welcher die Declination = Null ist, wo also die adeln direct nach Norden zeigen, heißt Agone. Die Veränderungen der Decliation nach der Zeit nennt man Variationen; man unterscheidet säculare, jährliche nd tägliche Variationen, sowie unregelmäßige Variationen, Störungen oder Perrbationen; die letzteren treten gewöhnlich zusammen auf mit Nordlichtern und ehen in einem noch unerklärten Zusammenhange mit den Sonnenflecken. Die äufigkeit der Störungen, die Häufigkeit der Nordlichter und die Zahl der Sonnflecken erreichen nämlich nach je 11 Jahren ein Maximum und in der Zwischenit ein Minimum, und die Maximalzeiten der drei Erscheinungen fallen zusammen; waren 1837, 1848, 1860, 1870 Maximalzeiten der Perturbationen, der Nordchter und der Sonnenflecken. (Näheres 564, Beschreibung der Sonne).

Die Karte (Fig. 280) stellt die Isogonen für das Jahr 1878 nach Evans dar; man sieht aus derselben, daß die isogonischen Linien ungefähr nordsüdlich wie die Meridiane verlaufen und wie diese durch die beiden geographischen, außerdem aber noch durch die magn. Pole gehen. Der magn. Nordpol (70° nördl. Br., 96° westl. L.), in dem viele Linien zusammenlaufen, ist durch einen weißen Punkt angegeben, der magn. Südpol (74° südl. Br., 148° östl. L.) liegt außerhalb der Karte, seine Lage wird jedoch durch die unterhalb Neuhollands zusammenlaufenden Linien angedeutet. Die Agone die Linie 0 ist stärker hervorgehoben. Sie zieht ungefähr durch Petersburg, Moskau, den Kaukasus und Persien in den indischen Ocean, biegt sich dort stark nach Osten, schneidet ein Stück von Neuholland ab und zieht dann ziemlich genau südlich durch den magn. zum geographischen Südpol; von dort geht sie durch das südliche Eismeer in den südatlantischen Ocean nordwestlich, schneidet ein Stück von Brasilien ab und zieht die kleinen Antillen entlang nach Nordamerika. In Carolina erreicht sie das Festland, durchzieht die Union bis zum Huronsee, wonach sie durch Canada und die Hudsonsbai auf dem magn. Nordpol anlangt, von wo aus sie durch den geogr. Nordpol und Spitzbergen geht, um zwischen dem weißen Meer und dem botnischen Meerbusen wieder nach Petersburg zu gelangen. Sie theilt die Erdoberfläche in 2 sehr ungleiche Theile; der kleinere enthält Europa, Afrika und den atlantischen Ocean, wo die Declination westlich ist; der größere enthält Asien, Australien, den großen Ocean und Amerika, wo die Decl. östlich ist. In Fig. 250 sind die Isogonen östlicher Decl. punktirt, die Isogonen westlicher Decl. ausgezogen. Die Decl. nimmt von der Agone an nach Osten und Westen hin zu: so ist sie in Constantinopel 5°, in Wien 10°, am Rhein 15°, in Paris 17°, in Irland 30°; in Asien nimmt sie nach Osten hin zuerst zu, dann ab und bildet sogar in Ostasien eine zweite in sich zurücklaufende Agone, innerhalb deren sie wieder westlich ist.

Die säcularen Variationen der Decl. sind aus folgenden Angaben für Paris ersichtlich: 1580 = 11° 30′ östl., 1618 = 8° östl., 1663 = 0°, 1700 = 8° westl., 1785 = 22° w., 1814 = 22° 34′ w., 1842 = 21° 25′ w., 1853 = 20° 17′, 1874 = 17° 30′ w.; die Decl. nahm also in 150 Jahren von 0° bis 22½° w. zu; würde der weitere Verlauf ähnlich sein, so ergäbe sich eine 600jährige Schwingung der Magnetnadel von 45°. Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß die westl. Decl. jetzt im Abnehmen begriffen, daß die Abnahme sehr langsam ist, aber allmälig zunimmt; sie betrug anfänglich, nach 1814 kaum 1′ per Jahr, macht aber jetzt mehr als 10′ aus. — Die jährliche Variation wird von Cassini (1786) für Paris folgendermaßen angegeben: von Januar bis April nimmt die Decl. zu, dann bis Anfang Juli ab, dann wieder zu bis April. Nach neueren Beobachtungen gilt dies nur für die Zeit der Zunahme der westl. Decl.; in unserem Viertel der 600jähr. Schwingung, wo die Decl. abnimmt, ist die Decl. in der Herbstnachtgleiche am größten und Ende April am kleinsten; auf der südlichen Halbkugel ist nach Brown (1874) die jährliche Variation im Ganzen entgegengesetzt; größte Werthe finden statt Anfangs Mai und Januar, kleinste Anfangs October und März. Auch der Mondumlauf scheint wie der Sonnenumlauf kleine Variationen zu bewirken (lunare Variation). Die tägliche Variation besteht darin, daß sich das Nordende von 8 Uhr Morgens bis 2 Uhr Nachmittags nach Westen bewegt und dann wieder zurückkehrt; sie beträgt bei uns durchschnittlich 9′, ist nach dem Aeq. zu etwas kleiner, und erfolgt auf der anderen Halbkugel in entgegengesetztem Sinne; in der nördlich polaren Gegend ist sie viel größer, steigt sogar bis auf 6°. Auch im Laufe eines Jahres ist sie veränderlich, beträgt z. B. bei uns im Winter 13—15′, steigt manchmal sogar auf 25′, während sie im Sommer auf 8—10′, ja manchmal auf 5′ herabsinkt. Die tägliche Variation folgt in der 11jährigen Periode am genauesten den Sonnenflecken, in dem Maaße, daß aus der täglichen Variation die Relativzahl der Sonnenflecken berechnet werden kann und umgekehrt; auch rechnet man das Max. der Sonnenflecken auf die Zeit, wo die größte tägliche Variation stattfindet. Die Störungen oder Perturbationen der Declinationsnadel, welche auch gleichzeitig mit Gewittern, Erdbeben und Vulkanausbrüchen auftreten, bestehen darin, daß die Nadel sich unregelmäßig in kleinen Zuckungen bald nach Osten bald nach Westen bewegt. Sie sind an Orten von gleicher geogr. L. gleichzeitig und in gleichem Sinne, nehmen aber nach dem Aeq. zu an Größe ab, und sind südlich von denselben der Richtung nach den nördlichen entgegengesetzt. Auch nach Osten und Westen hin zeigen sich die Störungen in gleicher Art, nur nehmen sie allmälig an Stärke bis auf Null ab für Orte, die um 90° des Parallelkreises von einander entfernt sind; dann nehmen sie auf der anderen Hälfte desselben in entgegengesetzter Richtung zu und erreichen ein Max. an dem Orte, der vom ersten Max. um einen Halbkreis entfernt ist.

Die Erklärung der Erscheinungen des Erdms. läßt noch viel zu wünschen übrig. Ein eigentlicher Erdms. wird von der Wissenschaft nicht mehr zugelassen, da nach Ampères Theorie (522.) aller Ms. aus el. Strömen besteht, sonach auch der Erdms. aus Strömen, welche die Erde von Osten nach Westen umkreisen. Hält man Edlunds Aethertheorie (533.), die zur Erklärung des Nordlichtes (609.) eine besonders gelungene Anwendung findet, für genügend, so ist das Wesen des Erdms. an sich nicht mehr dunkel, aber seine Erscheinungen und Ver-

inderungen bedürfen noch der Aufklärung. Leicht zu erklären ist, warum der M. Erde einen rei aufgehängten perm. oder temp. Eisenm. nicht nach seinen Polen hinzieht, sondern ihm los eine bestimmte Lage gibt. Weil der M. Erde so groß ist und außerdem aus bedeuenter Erdtiefe wirkt, so ist sein magn. Feld selbst in einem umfänglichen Raume gleichnäßig, auf die beiden Pole eines M. wirken gleiche, parallele und entgegengesetzte Kräfte, lso ein oder zwei Kräftepaare. Ein Kräftepaar bringt aber nur eine drehende und keine ortschreitende Bewegung hervor. Der M. stellt sich dabei in die Richtung des Kräftepaars der der Resultante der beiden Kräftepaare; eine völlig frei aufgehängte Magnetnadel, eine Inclinationsnadel gibt also die Richtung der Kraftlinien der Erde an. Besondere Schwieigkeiten bieten die säcularen Aenderungen, da dieselben wegen der Kürze der Beobachtungseit nur ungenügend bekannt sind; sie sprechen sich am deutlichsten in den Wanderungen der Isogonen, besonders der Agonen aus und in den Jahreszahlen der Wanderungen der Nadel. Die jetzt durch Brasilien, die Antillen und Carolina gehende Agone ging 1600 durch Schween über Westrußland und das Aegäische Meer nach Mittelafrika, 1700 lief sie mitten durch en atlantischen Ocean von Norden nach Süden, 1800 streifte sie die Ostspitze Brasiliens und den canadischen Seenkranz, während sie jetzt (Fig. 280) fast mitten durch Amerika zieht. Wichtiger ist eigentlich die Betrachtung der Wendezeiten, der Zeitpunkte, wo die Nadel aus er größten westlichen Abweichung, in der sie längere Zeit fast stationär verharrt, sich allnälig nach Osten bewegt; für unsere Gegend fand diese Wendung 1814, für London 1818 tatt. In Amerika geschah die umgekehrte Wendung in Halifax 1711, in den Neu-England-Staaten 1779, in den atl. Küstenstaaten im Osten und Südosten der Union 1780, im Südwesten 1830, im Westen (Californien) ist die Wendung noch nicht eingetreten und wird ür 1900 erwartet. Während die Periode unserer säc. Var. 600, nahezu = 5 . 11 . 11 Jahre umfaßt, dauert sie nach Charles Schott (1877) in Nordamerika 270, nahezu = 5 . 5 . 11 Jahre. Die Grundperiode von 11 J. für die Wiederkehr der Max. und von 5 J. für die der Minima wiederholt sich hier mehrfach, wie ja auch nach je 5 . 11 = 55 J. ein Hauptmaximum sowohl ür die Polarlichter wie für die Sonnenflecken besteht. Die Zahl 11 und ihre Hälfte 5 begegnen uns im Sonnensystem nur in dem größten Planeten desselben und in seinem Perihel und Aphel, wodurch die Vermuthung nahe gelegt wird, daß die Erscheinungen mit dem Jupiter zusammenhängen, was in meiner kleinen Schrift (Die Sonne 1869) zu erklären ersucht wurde. Die hierin dargestellte Sonnenfleckentheorie wird von G. Adams (1880) en aufgestellt; derselbe weist besonders darauf hin, daß die Declinationscurven für dieselbe bsolute Zeit aber für die verschiedensten Orte, wie Petersburg, Kew, Lissabon u. a. völlig übereinstimmen, daß auch die Störungen zu derselben absoluten Zeit an den verschiedensten Orten gleichförmig verlaufen, was auf eine gemeinschaftliche Ursache in der Sonne deute, ie in dem Aufsteigen und Niedersinken von Eisen gefunden werden könnte; hiermit scheint ine neu entdeckte 26 tägige Periode (Rotationszeit der Sonne) in den Variationen des Erdms. usammen zu stimmen.

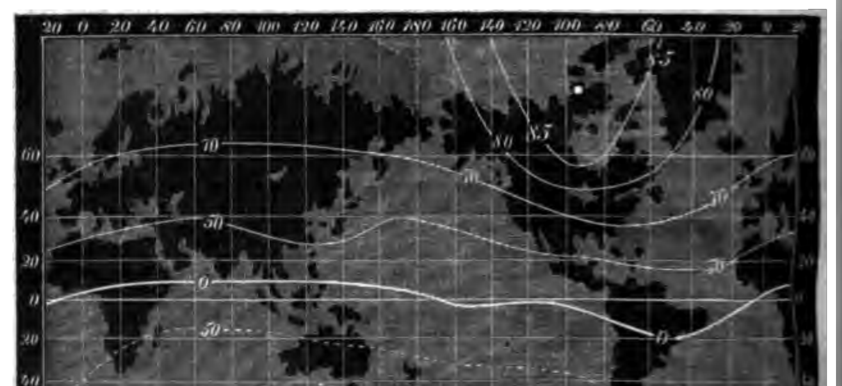
2. Die Inclination (Georg Hartmann 1543, Robert Norman 1576) 458 st der Winkel, den die Magnetnadel mit dem Horizont bildet. Sie muß hierbei ntweder ganz frei, nur mit ihrem Schwerpunkte an einen Coconfaden aufgehängt der wenigstens um eine wagrechte Achse drebar aufgestellt sein. Der Apparat zur Messung der Inclination heißt Inclinatorium; dasselbe muß die schwierige Bedingung erfüllen, daß die Achse genau durch den Schwerpunkt geht; ist diese Bedingung auch erfüllt, so ist die Beobachtung doch ungenau, weil die Achse auf orizontalen Lagern ruht und daher zu einer Reibung Veranlassung gibt, die einen Theil der Richtkraft aufhebt. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß die Nadel mit dem ganzen Apparat in den magnetischen Meridian gedreht werden muß; man tellt zu dem Zwecke den Apparat so auf, daß die Nadel sich vertical stellt, und dreht ihn dann um 90°, so ist er im magnetischen Meridian.

Beweis. Ist R die Größe der erdmagn. Intensität und i die Inclination, so ist die orizontale Componente $Q = R \cos i$ und die verticale $P = R \sin i$, woraus $\tang i = P / Q$. Ist nun die Nadel nicht im magn. Meridian, sondern in einer anderen vert. Ebene, die mit dem Mer. den W. α einschließt, so sind die beiden Comp. in dieser Ebene gleich den Projectionen der Meridiancomponenten; die vert. bleibt dieselbe, $P' = R \sin i$, weil sie er anderen vert. Ebene parallel ist, die hor. aber ist $Q = R \cos i \cos \alpha$; daher ist jetzt er Neigungswinkel i' gegeben durch die Gl. $\tang i' = P' / Q' = R \sin i / R \cos i \cos \alpha = \tang i / \cos \alpha$. Hieraus ist ersichtlich, daß i' mit α wächst; ist $\alpha = 90$, so ist $\tang i' = \tang i / 0 = \infty$, also ist $i' = 90$. Die Inclinationsnadel macht also den kleinsten Winkel mit dem Horizont, wenn sie sich im magn. Mer. dreht; die Inclination ist der kleinste Neigungswinkel, und der größte findet in einer zum Mer. senkrechten Verticalebene statt. — Das ge-

wöhnliche Inclinatorium besteht aus einer längeren Nadel, die mit einer wagrechten Achse auf wagrechten Lagern genau im Mittelpunkte eines verticalen getheilten Kreises ruht, der mit seinem Gestelle sich um den Mittelpunkt eines horizontalen getheilten Kreises drehen läßt, welcher auf einem Dreifuße ruht. Lloyd (1842) und Lamont (1854) haben andere Methoden eingeschlagen, wobei der letztere seinen Reisetheodolit benutzt.

Die Inclination ist wie die Declination zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten an einem Orte verschieden. Es gibt ebenfalls Orte gleicher Inclination; isoclinische Linien sind solche, welche Orte gleicher Inclination verbinden (s. Fig. 281). Wie die isogonischen Linien ungefähr den Zug

Fig. 281.



der Meridiane haben, so laufen die isoclinischen ungefähr wie die Parallelkreise. Die Inclination ist auf der nördlichen Halbkugel nördlich, d. h. der Nordpol ist nach unten gewendet, auf der südlichen Halbkugel südlich. Sie beträgt auf den beiden Magnetpolen der Erde 90° und nimmt von beiden nach dem Aequator zu ab; in der Gegend des Aequators ist die Inclination = Null, die Nadel steht wagrecht. Die Isocline, welche die Orte der Inclination Null verbindet, heißt **magnetischer Aequator**; derselbe schneidet den geographischen Aequator zweimal und entfernt sich bis 20° von demselben. Die Inclination hat ebenfalls säculare, jährliche und tägliche Variationen, sowie auch Perturbationen.

Auf unserer Karte ist der magn. Aeq., die Linie 0, etwas stärker gezeichnet, und der Nordpol, um den sich die Isocline von 85° herumzieht, als weißer Flecken erkennbar. Die Incl. war zu Paris 1661 = 75°, 1758 = 72°, 1805 = 69°, 1851 = 68°, 1878 = 65°, sie ist also in der Abnahme begriffen; diese Abnahme wird aber nicht wie bei der Decl. größer sondern kleiner; die jährliche Abnahme in Mitteleuropa beträgt jetzt 2—3′. Doch gibt es auch Gegenden, wo die Incl. zunimmt, z. B. von 1820—30 am Cap. Näheres über jährliche und tägliche Variationen kennen wir noch nicht. Die Variationen wurden überhaupt erst 1722 von dem berühmten Uhrmacher Graham entdeckt.

459 Die Intensität des Erdmagnetismus wird aus der horizontalen Richtkraft der Erde gefunden, indem man dieselbe durch den Cosinus des Neigungswinkels dividirt; denn die Intensität wirkt in der Richtung, in welche sich eine vollkommen frei aufgehängte Magnetnadel stellt, also in der Richtung der Inclinationsnadel. Da diese mit dem Horizont den Winkel i bildet, so ist die horizontale Componente der Intensität $P = R \cos i$, woraus $R = P / \cos i$. Die Bestimmung der Horizontalintensität wird in 461. gelehrt. Doch gibt diese Methode das Mittel in

r Beobachtungszeit. Um aber augenblickliche Aenderungen der Horizontalinten-
ät zu beobachten, dient das **Bifilarmagnetometer** von Gauß (1836).

Das Bifilarmagnetometer besteht aus einem Magnetstabe, der in einem Schiffchen
gt, das von 2 langen von der Decke herabhängenden Drähten getragen wird, und zwar
einer zur Declinationsnadel senkrechten Richtung, so daß die kleinste Aenderung der In-
nsität eine Drehung des Stabes erzeugt, die mit Fernrohr und Spiegel wie bei dem
ifilarmagnetometer beobachtet wird.

Die magnetische Kraft der Erde ist nach Gauß gleich derjenigen von 8464
illionen einpfündiger Magnetstäbe; jedoch ist die Erde als Magnet nicht mit
nem Magnetstabe zu vergleichen, der 2 Pole und eine Indifferenzzone hat; dies
llt am deutlichsten in die Augen durch **die isodynamischen Linien**, d. h.
nien, welche Orte gleicher Intensität verbinden; diese haben ungefähr einen
stöstlichen, doch nicht denselben Verlauf wie die isoclinischen Linien. Die Punkte
ßter Intensität (Focus) fallen nicht mit den Polen zusammen: auf der nörd-
hen Halbkugel gibt es 2 Maximalpunkte, einen in Nordamerika und einen in
ordasien; die Intensität ist in diesen Focis ungefähr 3 mal so groß als am
Minimalpunkte, der im atlantischen Ocean in 20° südl. Breite, bei der Insel
rinidad liegt. Auch die Intensität hat Variationen.

460 **Messung des Magnetismus nach absolutem Maße** (**Gauss, Intensitas vis
agneticae terrestris in mensuram absolutam revocata** 1833). Die Einheit
r Kraft, nach absolutem Maße gemessen, ist diejenige Kraft, welche der Masse
m 1^g in 1 Sec. eine Geschwindigkeit von 1^{cm} ertheilt; man bezeichnet diese **ab-
solute Krafteinheit** mit 1 g-cm-sec. In gewöhnlichem oder conventio-
ellem Kräftemaß ausgedrückt ist die absolute Krafteinheit = $0{,}00\,101\,915^g$.

Diese Bezeichnungen, in denen öfter noch die Bindestriche weggelassen werden, finden
h in neueren physikalischen Schriften häufig; die absolute Krafteinheit hat auch die Bezeich-
ung g cm sec; die Kraft, welche der Masse von 1^{kg} in 1 Sec. die Geschw. von 1^m ertheilt,
t hiernach = 1000 . 100 g-cm-sec, was auch geschrieben wird kg-m-sec. Um diese
usammenhänge kürzer schreiben zu können, werden die Potenzen von 10 durchgehends be-
utzt; so ist 1 kg-m-sec = 10^5 . g-cm-sec oder 1 g-cm-sec = 1 kg-m-sec . 10^{-5}.
Beiläufig gesagt, bringt auch in andere Gebiete der Physik die Anwendung der Potenzen
on 10 zur abgekürzten Bezeichnung immer mehr durch; z. B. die Wellenlänge λ der Frauen-
ofer'schen Linie A ist $\lambda = 0{,}0\,007\,601$; dies schreibt man auch so: $\lambda . 10^7 = 7601$; die obige
eziehung zwischen absolutem und gewöhnlichem Maße gibt man auch: 10^8 . g-cm-sec =
)1915g). Bei tieferem Eindringen in das absolute Maßsystem finden sich noch andere Bezeich-
ungen. Da z. B. die Geschw. c bekanntlich = s / t ist, also auch = s . t^{-1}, so schreibt man,
aß ein Körper die Geschw. von 7^m hat, auch so c = 7 . m sec^{-1}. Da weiter die Acceleration
nach Fl. (2) = c / t also = s / t^2 = s . t^{-2}, so schreibt man auch a = 7 . m sec^{-2} u. s. w.

Obiger Zusammenhang zwischen dem absoluten und dem gewöhnlichen Maße folgt
icht aus der bekannten Fl. p = mg. Die Kraft, welche jedem Körper, also auch der Masse
on 1^g die Geschw. $9{,}808^m = 980{,}8^{cm}$ ertheilt, ist die Anziehung der Erde, die ja durch
as Gewicht des fallenden Körpers gemessen wird, also = 1^g ist. Wenn nun die Kraft von
g die Geschw. $980{,}8^{cm}$ hervorruft, so ist für die Geschw. 1^{cm} nur der 908,8te Theil von
g erforderlich; also ist 1 g-cm-sec = 1 / 980,8 = $0{,}00\,101\,915^g$. Absolutes Maß wird
lso in gewöhnliches verwandelt, indem man mit dieser Zahl multiplicirt oder mit 980,8
ividirt; die absolute Krafteinheit ist als Gewicht ausgesprochen nur wenig größer als 1^{mg}.

Um nun den Ms. mit absolutem Maße zu messen, muß erst feststehen, wo wir uns
iese Kraft zu denken haben; an sich sind beide Msn. in jedem Mol. vorhanden; sie wirken
ber (nach 452.4) so, als ob sie in den Polen vereinigt wären; der Nordpol ist der An-
riffspunkt der Resultante aller Nordmsn., der Südpol der Angriffspunkt der Resultante
ller südmagn. Wirkungen der Molekularmagnete. Statt der complicirten Wirkung eines
anzen M. haben wir demnach die einfachere von 2 Polen ins Auge zu fassen, und zwar
ie Wirkung der zwei Pole eines M. auf die 2 Pole eines anderen M., da auch ein Stück
isen bei seiner Anziehung ein M. ist. Die Wirkung läßt sich noch mehr vereinfachen, in-
em man einen Pol des ersten M. so nahe an einen Pol des zweiten M. bringt, daß nur
iese beiden Pole aufeinander wirken.

Dem absoluten Maße entsprechend nehmen wir jenen Polmagnetismus als
Einheit an, der in der Entfernung von 1^{cm} einen gleich starken Pol mit der ab-

soluten Krafteinheit anzieht oder abstößt; dann ist die Kraft, welche zwischen 2 Polen von der Stärke m und m' in der Entfernung d wirkt, $F = mm' / d^2$. Denn nach Coulomb (1785) und Gauß (1833) steht die **Anziehung oder Abstoßung im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entfernung.** Coulomb fand diesen Satz experimentell nach der Schwingungsmethode und mittels seiner Drehwage.

Die Coulomb'sche Drehwage besteht aus einem weiten Glascylinder, der mit einer in der Achse des Cyl. durchbohrten Glasplatte bedeckt ist; in diese Durchbohrung ist eine Glasröhre eingekittet, die oben eine durchbohrte Deckelfassung mit einem drehbaren Knopfe trägt, von welchem ein feiner Silberdraht in den Cyl. hinabgeht. Die Deckelfassung ist mit einem getheilten Kreise versehen, auf dem ein vom Knopfe ausgehender Zeiger spielt. Der Silberdraht trägt unten im Cyl. ein Messingschiffchen, in welchem ein Magnetstäbchen liegt, in dessen Höhe die Cylinderwand ebenfalls eine Kreistheilung trägt. Der App. wurde so aufgestellt, daß sich der Stab im magn. Mer. befand, ohne daß der Draht irgend eine Verwindung oder Torsion hatte, während vorher festgestellt war, daß um den Stab um 1° aus dem magn. Mer. herauszudrehen, an dem Drahte eine an der Deckelfassung abzulesende Torsion von 35° vorgenommen werden mußte. Dann wurde durch eine zweite Oeffnung des Cylinderdeckels dem Nordpole des Stabes der Nordpol eines anderen M. genähert, wodurch derselbe um 24° abgestoßen wurde; darauf wurde am Kopfe gedreht, um den Stab in seine frühere Lage zurückzubringen; es waren 3 Umdrehungen nöthig, um die Ablenkung auf 17°, und 8 Umdrehungen, um sie auf 12° zu vermindern, so daß in den 3 Fällen die Entf. sich verhielten wie 24 : 17 : 12. Im ersten Falle war die Ablenkung = 24.35° in Torsion des Fadens ausgedrückt, vermehrt um diese Torsion selbst = 24.35 + 24 = 864°; im 2. Falle = 17.35 + 3.360 + 17 = 1692, im 3. = 12.35 + 8.360 + 12 = 3312; die abstoßenden Kräfte in den Entf. 24 : 17 : 12 verhielten sich also wie 864 : 1692 : 3312, was eine leichte Rechnung als völlig in Uebereinstimmung mit dem umgekehrten Verhältnisse der Quadrate der Entf. zeigt.

Wenn wir nun die Wirkung zweier ganzen M. auf einander ins Auge fassen wollen, so müssen wir uns erinnern (451.6), daß bei größerer Entf. von einem Pol, so lange der zweite M. im magn. Felde des ersten verweilt, ein Kräftepaar auf denselben einwirkt, dessen Richtung durch die magn. Kraftlinien und dessen Größe durch die Intensität des magn. Feldes bestimmt ist. Die Intensität des magn. Feldes ist gleich der Polstärke dividirt durch das Quadrat der Entf. vom Pole; bringen wir den zweiten M. an eine solche Stelle des magn. Feldes, dessen Intensität = 1 ist, so ist sein Kräftepaar = ml, wenn seine Polstärke mit m und seine Poldistanz mit l bezeichnet wird. Denn es ist leicht zu beweisen, daß zwei Kräftepaare einander gleich sind, wenn das Product der Kraft mit der Entf. der Angriffspunkte bei beiden dasselbe ist; demnach wird ein Kräftepaar gemessen durch das Product einer Kraft mit der Entf. der Angriffspunkte der beiden Kräfte. Ist nun im magn. Felde 1 das Kräftepaar = ml, so wird dasselbe an einer Stelle von der Intensität F durch den Ausdruck ml/F gemessen.

Die Wirkung, die ein M. erfährt und ausübt, hängt also in erster Linie von dem Product $ml = M$ seiner Polstärke und der Distanz der beiden Pole ab, die bekanntlich nicht genau mit der Länge des M. zusammenfällt. Man nennt das Product aus der Polstärke und der Poldistanz das **magnetische Moment.**

Da ein M. offenbar um so mehr Ms. enthält, je stärker seine Pole sind und je größer deren Abstand ist, so gibt das magn. Moment eine Vorstellung von dem wirkungsfähigen Ms. eines M., wodurch sich der Name und die Thatsache erklären, daß man häufig die Wirkungsfähigkeit eines M., seinen Gehalt an wirksamem Ms. durch den Ausdruck magn. Moment bezeichnet. Außerdem läßt sich für jeden Ms. das magn. Moment durch Beobachtung und Rechnung auffinden, wie wir bald sehen werden. Endlich könnte man durch Division von M mit l die Polstärke m finden; da jedoch l nie genau bekannt ist, so begnügt man sich mit der Kenntniß von M, was für die Anwendung ausreicht. Aus dem magn Moment läßt sich auch die Horizontalintensität H des Erdms. berechnen und dadurch bekanntlich die Intensität des Erdms. selbst, indem man jene mit dem Cosinus der Incl. dividirt.

461 **Das magnetische Moment und die Horizontalintensität des Erdmagnetismus.** Für diese beiden Größen M und H besteht eine Productengleichung und eine Quotientengleichung. Die Productengleichung heißt: $HM = 4\pi^2 n^2 T$, worin n die Anzahl der Doppelschwingungen bedeutet, die der horizontal drehbar aufgehängte und aus seiner Gleichgewichtslage gebrachte Magnet in einer Sec. vollzieht, während T sein Trägheitsmoment bezeichnet.

Beweis. Wie bei einem aus seiner Gleichgewichtslage gebrachten Pendel die Schwer-aft sich nicht ändert und die zurücktreibende Comp. nur durch die Richtungsänderung mobi-irt wird, so ändert sich auch bei einem aus seiner Lage gebrachten M. die Kraft des Erdms. icht und die zurücktreibende Comp. wird nur durch die Richtungsänderung modificirt; her gilt hier dieselbe Fl. wie dort $t = 2\pi\sqrt{l/g}$ und $l = T/ma$, woraus $t = 2\pi\sqrt{T/mag}$ $= 2\pi\sqrt{T/pa}$. Dieses pa ist das statische Moment des Gewichtes, also der zurücktreibenden raft, wofür hier das stat. Mom. der Horizontalintensität H zu setzen ist. Wir verstehen nter Horizontalintensität H die hor. Comp. des Erdms., welche auf einen Pol von der tärke 1 wirkt; auf unsern Pol von der Stärke m ist sie demnach $= Hm$. Die Richtkraft irkt aber an beiden Polen in entgegengesetzter Richtung, also in demselben Sinne drehend; reht sich der M. um einen Punkt, der um x von dem einen, also um $l - x$ von dem nderen Pole entfernt ist, so ist das stat. Moment $= Hmx + Hm(l - x) = Hml$. Setzen ir diesen Werth statt pa in die letzte Fl. ein, so erhalten wir $t = 2\pi\sqrt{T/Hml}$ oder da l das magn. Moment $= M$ ist, so ist $t = 2\pi\sqrt{TH/M}$. Da nun t bekanntlich $= 1/n$, entsteht durch Umstürzen und Quadriren $n^2 = HM/4\pi^2 T$ woraus $HM = 4\pi^2 n^2 T$.

Grade zu diesem Zwecke hat Gauß sein Magnetometer construirt, da man mittels des-lben aufs Genaueste die Schwingungszeit t, also auch die Schwingungszahl n beobachten nn. Das Trägheitsmoment T jedes geom. Körpers ist als bekannte Größe anzusehen; doch kann es auch mittels des Magnetometers praktisch bestimmt werden, indem man über n Stab eine Holzleiste mit 3 gleichen angehängten Gewichten von bekanntem Trägheits-oment legt; aus der ursprünglichen und der veränderten Schwingungszeit kann das T ch für den unregelmäßigsten Körper gefunden werden. Denn die letzte Gl. ergibt für das ngeänderte Magnetometer $T = HM/4\pi^2 n^2 = HMt^2/4\pi^2$, und für das Magnetometer, s mit dem Körper vom Trägheitsmoment T_1 beschwert ist, $T + T_1 = HM/4\pi^2 n_1^2 =$ $HMt_1^2/4\pi^2$, woraus durch Division folgt $T + T_1 : T = t_1^2 : t^2$ oder nach der Differenzen-roportion $T_1 : T = t_1^2 - t^2 : t^2$, woraus $T = T_1 t^2/(t_1^2 - t^2)$, worin auch eine Methode gt, das Trägheitsmoment eines beliebig geformten Körpers zu finden.

Die Quotientengleichung heißt $M/H = r^3 \tang \varphi$, worin r ie Entfernung eines größeren (Fig. 282) senkrecht zum magn. Meridian befestigten M. NS von einem kleineren beweglichen R. ns bedeutet und φ die Ablenkung des kleinen aus dem Me-idian durch den großen. In jener Gleichung steckt auch das Gesetz: **Wenn beide Pole eines Magnets auf einen nderen wirken, so steht die Anziehung im umge-ehrten Verhältniß zum Cubus der Entfernung.**

Fig. 282.

Beweis. Ist m die Polstärke des großen M. NS, so ist die irkung des Nordpols N in der Richtung No und die des Südpols S der Richtung So auf den kleinen M. $= m/r^2$, wenn $No = So = r$. tellen ao und co diese Kräfte vor, so ist bo, ihre Resultante, die ichtung der Kraftlinien und die Intensität F des magn. Feldes des roßen M. Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke abo und NSo folgt o : bo = oS : NS oder $m/r^2 : F = r : l$, woraus $F = ml/r^3 = M/r^3$, omit das obige Gesetz bewiesen ist. Ist nun M_1 das mag. Moment s kleinen M., so ist das auf ihn wirkende Kräftepaar vom großen R. (nach 460.) in unabgelenkter Lage $= M_1 F$; ist er aber durch den roßen M. um den Winkel φ aus dem magn. Meridian Oo abgelenkt, ist es nach dem Parallelogramm der Kräfte nur noch $M_1 F \cos \varphi =$ $MM_1 \cos \varphi / r^3$. Das Kräftepaar des Erdms. H aber, das in der Richtung des Meridians, so senkrecht zu dem vorigen wirkt, ist ebenfalls nach 460. und dem Parallelogramm der räfte $= HM_1 \sin \varphi$. Zur Ruhe gelangt der kleine M. in der abgelenkten Lage, wenn diese iden Kräftepaare einander gleich sind; hierdurch entsteht die Gl. $MM_1 \cos \varphi / r^3 = HM_1 \sin \varphi$, oraus $M/H = r^3 \tang \varphi$.

Durch die Verbindung der Productengleichung für MH und der Quotienten-leichung für M/H lassen sich die beiden Unbekannten M und H finden:

$$H = 2n\pi \sqrt{T/r^3 \tang \varphi} \text{ und } M = 2n\pi \sqrt{Tr^3 \tang \varphi}.$$

Gauß berechnete nach dieser Methode, daß damals die Horizontalintensität des Erdms. Göttingen 1,775 mg-mm-sec betrug, daß also die Totalintensität des Erdms. = 775 / cos 68° 1′ = 4,741 mg-mm-sec ausmachte; da die Schwerkraft in Göttingen jedem örper in 1 Sec. eine Geschw. von $9{,}811^m = 9811^{mm}$ ertheilt, so ist die Schwerkraft dort 9811 mg-mm-sec, also 2070 mal so stark als der Erdms. Nach den isodynamischen arten von Evans (1878) ist die Intensität des Erdms. im amerikanischen nördlichen Focus

= 6,55, im asiatischen = 6,22, im stärkeren südlichen Focus 7,06, im schwächeren 6,92 mg-mm-sec, während die schwächste Erdkraft 2,44 mg-mm-sec beträgt, so daß also das Max. die dreifache Stärke des Min. hat. Ist das magn. Moment eines M. und seine Länge bekannt, so ist auch die Intensität des magn. Feldes zu finden. Der eine Pol m bringt auf den Pol 1 an dem Punkte von der Distanz r die Intensität hervor m/r^2; da nun $m = M/l$, so ist die Intensität des Feldes durch diesen Pol $= M/lr^2$. Ebenso findet man die vom anderen Pole bewirkte Intensität; setzt man die beiden Intensitäten nach dem Parallelogramm der Kräfte zusammen, so erhält man in der Richtung der Resultante die Kraftlinien und in der Größe die Intensität des Feldes.

Mittels der Fl. für M oder auch mit der Productengleichung lassen sich die magn. Momente zweier Stäbe an demselben Orte der Erde, wo und so lange H denselben Werth behält, vergleichen; denn für einen Stab ist $MH = 4\pi^2 n^2 T$ und für einen anderen $M_1 H = 4\pi^2 n_1^2 T_1$, woraus $M : M_1 = n^2 T : n_1^2 T_1$ oder wie $T/t^2 : T_1/t_1^2$. Ebenso läßt sich aus der Productengleichung das Verhältniß der Horizontalintensitäten des Erdms. an zwei verschiedenen Orten oder an einem Orte zu verschiedenen Zeiten finden, vorausgesetzt, daß man denselben M. schwingen läßt, daß also das magn. Moment M in den verschiedenen Fällen dasselbe bleibt; denn alsdann ist im ersten Falle $MH = 4\pi^2 n^2 T$ und im zweiten $MH_1 = 4\pi^2 n_1^2 T$, woraus $H : H_1 = n^2 : n_1^2$; *die Horizontalintensitäten an verschiedenen Orten verhalten sich wie die Quadrate der Schwzn.* Von der Richtigkeit dieses Satzes kann man sich annähernd überzeugen, wenn man einen starken Magnetpol in die Nähe einer Nadel bringt und die Schw. in 1 M. zählt; in halber Entf. wird die Schwz. 2mal so groß, zeigt also, daß der 4fachen Kraft die doppelte Schwz. entspricht. Humboldt benutzte diesen Satz zu den ersten Erforschungen der Intensität des Erdms., konnte aber nur ungenaue Resultate erhalten, weil die schwingenden Nadeln ihre Kraft nicht unverändert beibehalten. Die Gauß'sche Methode durch die Fl. für H ist von diesem Umstande unabhängig.

462 Aufg. 725. Zu zeigen, daß nach allen Richtungen durcheinander liegende Molekularm. keine magn. Wirkung haben können. — A. 726. Die anziehende Wirkung ungleichnamiger und die abstoßende gleichnamiger Pole durch die gleich gerichteten Molekularm. zu erklären. — A. 727. Die Wirkung des einfachen Striches mit einem Nordpole auf die Molekularm. darzustellen. — A. 728. Die Wirkung des getrennten Striches für den vorangehenden Südpol. — A. 729. Die Wirkung des Doppelstriches mit dem Nordpole. — A. 730. Die Wirkung des Kreisstriches mit dem Südpole. — A. 731. Den Einfluß der Erschütterung bei der Magnetisirung und auf einen M. zu erklären. — A. 732. Torsion und Magnetisirung zu vergleichen und daraus einige Wiedemann'sche Sätze zu folgern. — A. 733. Den Einfluß der Wärme aus der Lockerung der Molekularm. zu entwickeln. — A. 734. Welche Stellungen nimmt eine Declinations-Nadel an, wenn sie um einen Pol herumgeführt wird? — A. 735. Warum verliert ein unbeschäftigter M. an Tragkraft? — Antw.: Molekularanziehung und Molekularmagnete. — A. 736. Die magn. Kraft zwischen den Polen eines Hufeisens zu erklären. — A. 737. Wenn man einen Hufeisenm. in Eisenpulver taucht, so bildet sich eine Brücke, die an einem Ende angezündet, ganz durchbrennt und eine compacte magn. Masse wird; warum? — A. 738. Wie groß ist nach Häckers Formel die Tragkraft eines M. von 1kg? Aufl.: $T = 10{,}33 \sqrt[3]{1^2} = 10{,}33$kg. — A. 739. Wie groß ist nach Häckers Formel das Gewicht des M., der sein eigenes Gewicht tragen kann? Aufl.: $P = a^3 = 1104$kg. — A. 740. Wie groß ist die Richtkraft einer Nadel, die unter dem Winkel α gegen ihre Declinationslage gerichtet ist, wenn dieselbe in der senkrechten Richtung = P ist? Aufl.: $P \sin \alpha$. — A. 741. Wie groß ist diese Richtkraft unter 30°? Aufl.: ½P. — A. 742. Wie verhalten sich die Intensitäten des Erdms. an 2 Orten von gleicher Incl., an welchen dieselbe Nadel in 1 M. 70 und 80 Schw. macht? Aufl.: 49 : 64. — A. 743. Ein langer Eisenstab erhält in England durch den Erdms. einen Pol von 5,74 g-cm-sec; mit welcher Kraft zieht dieser den 1m entfernten gleich starken Pol eines anderen Stabes an? Aufl.: $F = mm_1/d^2 = 0{,}00329$ g-cm-sec. — A. 744. Wie findet man die magn. Decl. mit einem Inclinatorium? Aufl.: Durch das Minimum der Neigung gegen den Horizont. — A. 745. Läßt man eine Inclinationsnadel zuerst im magn. Mer. und dann in der dazu senkrechten Ebene schwingen, so kann man aus den Schwzn. n und n_1 die Incl. berechnen; wie? Aufl.: In dem Mer. wirkt die volle Kraft R, in der senkr. Ebene nur die vert. Comp. = R sin i; hieraus folgt $\sin i = n^2 / n_1^2$. — A. 746. Sei die Schw. per Min. im Meridian = 15, in der senkr. Ebene = 14; wie groß ist die Incl.? Aufl. 87,1°.

Neunte Abtheilung.

Die Elektricität.

1. Die Reibungs-Elektricität.

463 **Elektrische Grunderscheinungen.** (Gilbert, de magnete 1600). Wenn man :nen Glasstab mit einem Kautschuklappen oder einen Harzstab mit einem Pelzlappen :ibt, so erlangen die Stäbe wie die Lappen die Eigenschaft, leichte Körperchen anzu- :ehen und nach der Berührung wieder abzustoßen, sowie gegen den genäherten Finger :nisternde, stechende Funken auszustoßen. Körper, welche diese Eigenschaft haben, :erden elektrische genannt, und die uns in ihrem Wesen unbekannte Kraft, :elche diese Körper besitzen, nennt man Electricität.

Schon den alten Griechen war die Eigenschaft des Anziehens am geriebenen Bernstein :λεκτρον, electron) bekannt, woher sich die Namen erklären. Die einfachsten Versuche :ssen sich schon mit einer Siegellackstange, die man mit einem wollenen Lappen reibt, und :n Hartkautschukfedergriffen, die man mit einem Taschentuche reibt, machen; doch gelingt :e Abstoßung seltener, aus einem später klar werdenden Grunde. Leichter gelingt es mit :ügelchen von Hollundermark oder Kork, welche unter einem Glasstabe lebhaft auf- und ab- :nzen, wenn man denselben mit Kautschuk reibt, oder mit einem Lederlappen, auf den man :ittels Talg etwas Zinn-Zink-Amalgam gestrichen hat. Das Knistern und Funkensprühen :merkt man häufig schon beim Reiben, besonders einer großen Glasröhre mit einem Katzen- :lle. — Gilbert zeigte zuerst, daß durch Reiben noch eine große Zahl von Körpern elektrisch :ird, die er elektrische, idioelektrische nannte, während es ihm mit Metallen u. a. Körpern :icht gelang, die er deßhalb unelektrische oder anelektrische Körper nannte. Otto von Guericke :nd die Abstoßung und bemerkte zuerst ein schwaches Leuchten und Knistern; der eigentliche :ektrische Funke mit Knall wurde von Wall zuerst wahrgenommen.

464 **Die elektrische Mittheilung.** Das elektrische Pendel besteht aus einem :ügelchen von Hollundermark, das mittels eines Seidenfadens an einem Glasgestelle :sgehängt ist. Nähert man demselben eine geriebene Glas- oder Harzstange, so wird :as Kügelchen zuerst angezogen, berührt die Glasstange und springt dann lebhaft ab. :a das Kügelchen vor der Berührung angezogen, nach der Berührung abgestoßen wird, : muß bei der Berührung etwas mit demselben vorgegangen sein. Zu näherer :rüfung nähern wir ihm ein zweites, kleineres, ebenfalls an einem Seidenfaden :ängendes Kügelchen und finden, daß dieses zweite von dem ersten angezogen und :ach der Berührung abgestoßen wird. Das erste Kügelchen ist demnach durch :erührung mit dem Stabe elektrisch geworden. Die Electricität kann :urch Berührung einem anderen Körper mitgetheilt werden.

Hieraus erklärt sich die Erscheinung, daß das erste Kügelchen nicht mehr abgestoßen, :ondern wieder angezogen wird, wenn wir es mit der Hand anfassen; es hat durch unsere :erührung seine El. verloren; weiter erklärt es sich, daß das berührte Kügelchen auch all- :mälig immer weniger und endlich gar nicht mehr abgestoßen, sondern wieder angezogen wird; : kehrt in der Luft allmälig in seinen früheren Zustand zurück, es wird unel., weil es an :e ringsum liegende Luft seine El. verliert. Benutzt man bei dem el. Pendel einen Metall- :er Leinenfaden, der an einem Metallgestelle hängt, so wird das Kügelchen zwar angezogen, :er trotz Berührung nie abgestoßen; es verliert seine El. an die es berührenden Körper. :uch der Name des el. Pendels erklärt sich durch die Mittheilung.

465 Von einem Körper, der durch Reibung oder Mittheilung oder andere Vorgänge :ektrisch geworden ist, sagt man, er sei mit Elektricität geladen; hat er die El. durch :erührung oder andere Vorgänge wieder verloren, so sagt man, er sei entladen.

Gute und schlechte Leiter (Gray 1727). Hängt man an das elektrische :endel ein zweites Pendel an einem Metallfaden oder Leinenfaden und theilt dem :sten Kügelchen Elektricität mit durch Berührung mit einem geriebenen Glasstabe, : wird auch das zweite Kügelchen von diesem Stabe abgestoßen, es zieht ebenfalls :n drittes kleineres Kügelchen an und stößt es dann ab. Die Elektricität geht :so durch Metall und Leinen. Hängt aber das zweite Pendel an einem Seiden-

faden, Glasfaden oder Haar, so wird das zweite Kügelchen von der Glasstange immer angezogen, wie ein gewöhnlicher Körper, es zieht nie ein drittes Kügelchen an. Die Elektricität geht also nicht durch Seite, Glas, Haare. **Die Körper zerfallen hinsichtlich der Fortpflanzung der Elektricität in Leiter und Nichtleiter, oder besser in gute und schlechte Leiter**, da es absolute Nichtleiter nicht gibt. Die schlechten Leiter nennt man **Isolatoren**, weil ein Körper seine Elektricität behält, wenn er von lauter schlechten Leitern umgeben ist; einen Körper elektrisch isoliren heißt, ihn mit schlechten Leitern umgeben; die guten Leiter nennt man auch **Conductoren**. Nach Wiedemann und Franz (1853) ist die Leitungsfähigkeit der Metalle für Elektricität dieselbe wie für Wärme, jedoch findet nach Arndtsen (1858), sowie nach Matthießen und Vose eine scharf ausgeprägte Veränderlichkeit des el. Leitungsvermögens mit der Temperatur statt, und zwar für die weitaus meisten Metalle in nicht sehr verschiedenem Grade, indem die Leitungsfähigkeit von 0 bis 100° durchschnittlich um 30% abnimmt.

Der wesentliche Unterschied zwischen guten und schlechten Leitern ist folgender: Theilt man einem guten Leiter Elektricität mit, so breitet sie sich über der ganzen Oberfläche aus; berührt man einen elektrischen guten Leiter an einer Stelle, so gibt er seine ganze Elektricität ab. Theilt man einem schlechten Leiter durch Berührung Elektricität mit, so bleibt dieselbe an der Berührungsstelle; berührt man einen elektrischen schlechten Leiter, so verliert er seine Elektricität nur an der Berührungsstelle.

Die besten Leiter sind die Metalle (Silber, Kupfer, Gold, Zink, Platin, Eisen, Zinn, Blei, Quecksilber); dann folgen Kohle, Wasser und alle wässerigen Flüssigkeiten und wässerig feuchten Körper, wie der menschliche, thierische und frische Pflanzenkörper, sowie die feuchte Erde und feuchte Luft. Die besten Nichtleiter sind: Glas, Harz, Seide, Schwefel, trockene Luft, Oele und alle fetten Körper, Alkohol und Aether; Halbleiter sind Steine und trockenes Holz. Nach Sald Effendi (1869) ist, wenn die Leitungsfähigkeit von Wasser = 1000 gesetzt wird, die von Petrol = 72, Schwefelkohlenstoff = 55, Alkohol = 49, Aether = 40, Terpentinöl = 23, Benzol = 16. Feste Nichtleiter werden beim Erhitzen weniger gute Nichtleiter, und wenn sie dem flüssigen Zustande nahe kommen, immer bessere Leiter; umgekehrt ist Eis ein Nichtleiter. Wie überhaupt die Metalle und a. Leiter bei steigender Temp. immer weniger gut leiten, so werden umgekehrt die Metalloide u. a. Nichtleiter bei steigender Temp. immer besser leitend; die Luftarten sind nach Hittorf (1874) bei sehr hoher Temp. und sehr starker Verdünnung ziemlich gute Leiter.

Weil der menschliche Körper ein Leiter ist, die feuchte Erde ebenfalls, und weil die Erde ein unerfüllbares Reservoir für El. ist, so verliert jeder von uns berührte Leiter all seine El., indem sie von dem ganzen Leiter in unsere Hand und in die Erde strömt; daher wird das von uns berührte Kügelchen sofort unelektrisch. Den Glasstab, den wir zum Zwecke der Elektrisirung reiben, können wir in der Hand halten; denn die an anderen Stellen erregte El. geht nicht an die Berührungsstelle. Würde aber ein Metallstab, den wir so reibend festhalten, durch das Reiben el. werden, so würde seine El. in die Erde gehen. Und das ist auch die Ursache, warum Gilbert die Metalle für unel. hielt und die schlechten Leiter für el. Gray zeigte schon das Irrige dieser Benennung: er befestigte einen Metallstab an einem Glasstabe und rieb jenen mit einem Katzenfelle, so zeigte er sich ebenso el. wie ein geriebener Harzstab; die anelektrischen Körper waren gute Leiter, verloren also ihre El. durch die Hand; die idioelektrischen Körper waren dagegen nur schlechte Leiter, deren Reibungsel. an der Entstehungsstelle sitzen blieb. — Leiter, die man elektrisiren will, muß man mit schlechen Leitern umgeben, **isoliren**; die Maschinen zum Elektrisiren haben Füße und Ständer von Glas oder Hartkautschuk; ein Mensch, der elektrisirt werden soll, muß sich auf einen Schemel mit Glasfüßen stellen, auf einen Isolirschemel. Da das Glas indessen leicht eine Wasserhaut anzieht, so gibt man ihm einen Firnißüberzng, und vor dem Gebrauche muß man die Stäbe und Füße durch Erwärmen und Reiben gehörig trocknen. — Wäre die atmosphärische Luft ein guter Leiter, so würde uns wohl die El. ganz unbekannt sein, da jede neu erzeugte El. sofort in die Erde fließen würde; feuchte Luft ist ein schlechter Nichtleiter; daher gelingen viele el. Versuche bei feuchter Luft nicht.

Die Leitungsfähigkeit des Selens (Se) gewann ein besonderes Interesse, da dieselbe zur Erfindung des **Photophons** nnd der **Radiophonie** führte. Willoughby Smith beobachtete zuerst (1873), daß krystallinisches Se durch Beleuchtung eine größere Leitungsfähigkeit erhält, die mit der Lichtstärke wächst. Nach Sale (1873) geschieht die Erhöhung der Leitungsfähigkeit plötzlich, also nicht durch Erwärmung, jedoch durch schwach

brechbare Strahlen, von denen aber nach Lord Rosse (1874) die dunkeln nicht wirken. Nach Siemens (1875) leitet das amorphe Se metalloidisch, d. h. bei höherer Temp. besser als bei niederer, während das krystallinische Se metallisch, bei höherer Temp. schlechter leitet und seine Leitung durch Belichtung verstärkt; am besten zeigte diese Wirkung bei Siemens' Versuchen ein solches Se, das durch längeres Erhitzen auf 210° krystallinisch grobkörnig geworden war; seine Leitungsfähigkeit stieg proportional zur Quadratwurzel aus der Lichtstärke. Auch nach S. treten die Erhöhung der Leitungsfähigkeit durch Belichtung und die Schwächung durch Dunkel plötzlich ein, die völlige Herstellung der früheren Leitung dagegen allmälig. Wie es Bell und Tainter 1880) gelang, die Empfindlichkeit kleiner Selenzellen gegen das Licht hinsichtlich der Leitung besonders hoch zu steigern, ist beim Photophon (535. 12) zu betrachten.

Positive und negative Elektricität (Du Fay 1733). Ein von der geriebenen Glasstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von dem Gummilappen angezogen, von der Harzstange angezogen, von dem Pelzlappen abgestoßen; die Glasstange hat also dieselbe Wirkung wie der Pelzlappen, aber die entgegengesetzte der Harzstange und des Kautschuklappens. Ein von der Harzstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von dem Pelzlappen angezogen, von der Glasstange angezogen, von dem Kautschuklappen abgestoßen; wieder haben Glas und Pelzlappen dieselbe, Harz und Gummilappen dieselbe, aber der vorigen entgegengesetzte Wirkung. Während also Harz, Kautschuk, Glas und Pelz alle elektrisch sind, sämmtlich leichte Körperchen anziehen und nach der Berührung abstoßen, so haben sie doch eine Verschiedenheit; was Glas und Pelz anziehen, stoßen Harz und Kautschuk ab und umgekehrt; Glas und Pelz verhalten sich aber ganz gleich, ebenso Harz und Kautschuk. Untersucht man alle anderen elektrischen Körper, so verhalten sie sich entweder wie Glas und Pelz, sie stoßen das glasberührte Kügelchen ab und ziehen das harzberührte an; oder sie verhalten sich wie Harz und Kautschuk, sie stoßen entgegengesetzt das harzberührte Kügelchen ab und ziehen das glasberührte an. Hieraus ergeben sich folgende Sätze: 1. *Es gibt zwei, aber nur zwei Arten von Elektricität, Glaselektricität und Harzelektricität.* 2. *Die 2 Elektricitäten haben entgegengesetzte Wirkungen*; was die eine anzieht, stößt die andere ab; Franklin (1747) nannte sie daher *positive* und *negative* Elektricität. 3. *Durch Reiben entstehen immer beide Arten von Elektricität, im Reiber*, Glas und Harz, *die eine, im Reibzeug*, Kautschuk und Pelz, *die andere*, im ersten Reiber und zweiten Reibzeug die positive, im zweiten Reiber und ersten Reibzeug die negative.

Positiv und negativ sind nicht wie häufig in der Mathematik zu verstehen, nicht so, daß das Negative einen Mangel an dem ausdrückt, was positiv ist, wie es z. B. bei Vermögen und Schulden der Fall ist. Vielmehr ist die neg. El. ebensowohl El. als die pos., und die beiden Ausdrücke bedeuten nur, daß sie in einem Gegensatze zu einander stehen und sich wie entgegengesetzte Größen ganz oder theilweise aufheben, was erst später erhellen wird. Diese noch von den meisten Physikern festgehaltene Ansicht rührt von Sommer (1759) her. Franklin und Aepinus hatten eine andere Ansicht aufgestellt; sie faßten die pos. El. als eine Vermehrung, die neg. als eine Verminderung einer Elektricitätsart auf. Die Anhänger der ersten Ansicht werden *Dualisten* genannt, die der zweiten *Unitarier*. Die unitarische Theorie gelangte zu neuem Ansehen durch Edlunds Theorie der El. (533.), da nach dieser die pos. El. mit dem Lichtäther identisch ist: pos. El. ist ein Ueberschuß, neg. El. ein Mangel von Lichtäther. Auch englische Physiker haben die unitarische Theorie wieder angenommen.

Welche Körper durch Reiben pos. und welche neg. werden, hängt von ihrem materiellen Unterschiede, oft auch von der Beschaffenheit der Oberfläche ab; man könnte daher an der Art der El. zweifelhaft werden; die bestimmteste Entscheidung gibt trockenes, reines Glas, das mit amalgamirtem Leder gerieben wird; das Glas wird dann immer pos., das Leder neg. Ebenso entschieden wird nach Poggendorff Pyroxilinpapier zwischen den Fingern durchgezogen, sowie bei jeder anderen Reibung negativ, wie Gummibälle selbst bei feuchter Luft. Young (1807), Faraday (1843) und Hagenbach (1873) haben die Elektricitätserreger in eine sogenannte Spannungsreihe geordnet, in welcher jeder vorhergehende Körper durch Reibung mit allen folgenden pos., und jeder nachfolgende durch Reibung mit allen vorhergehenden neg. el. wird. Faradays Reihe ist: Katzen- und Bärenfell, Flanell, Elfenbein, Federkiele, Bergkrystall, Flintglas, Baumwolle, Leinwand, weiße Seide, die Hand, Holz, Lack, Eisen und andere Metalle, Schwefel. Youngs Reihe stimmt nur im Allgemeinen mit dieser überein, aber

nicht im Einzelnen, woraus ersichtlich ist, daß andere Einflüsse, Oberfläche, Temp., Art des Reibens bedeutend mitwirken.

Nicht blos Reiben, sondern auch **andere mechanische Operationen** erregen El.: Späne von Feilen, Schaben u. dgl. sind el.; zerschnittener Kork, gespaltene Glimmer- und Gypsplättchen, zerbrochene Siegellackstangen zeigen El.; Mineralien, wie Doppelspath, Arragonit, Flußspath, Bergkrystall werden **durch Druck** zwischen den Fingern, mehrfach zusammengelegter Wachstaffet durch Zusammenpressen el. Viele Krystalle, wie z. B. Turmalin, werden **durch Erwärmen** polarisch, d. i. am einen Ende pos., am anderen Ende neg. el.; die Polarität ist beim Erkalten umgekehrt wie beim Erwärmen. Die Flammen von Wasserstoff, Alkohol, Wachs, Aether, Oel und Fett sind el.; doch sind die Flammen oder wenigstens der aus ihnen entwickelte Gasstrom auch gute Leiter, so daß man einen el. Stab einfach dadurch unel. machen kann, daß man ihn über eine Flamme hinführt.

467 **Grundgesetze der Elektricität** (Du Fay 1733). 1. Berührt man zwei an Seidenfäden hängende Hollundermarkkügelchen mit der geriebenen Glasstange, so stoßen sie einander ab. 2. Berührt man die zwei Kügelchen mit der geriebenen Harzstange, so stoßen sie einander ab. 3. Berührt man das eine Kügelchen mit der Glasstange, das andere mit der Harzstange, so ziehen sie einander an; berühren sie sich, so findet nach der Berührung weder Anziehung noch Abstoßung statt, beide Kügelchen sind unelektrisch, obwohl sie jetzt beide Elektricitäten gemischt enthalten. 4. Ein mit der Glasstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, aber von der Harzstange angezogen, und ist nach der Berührung mit dieser wieder unelektrisch. 5. Ein mit der Harzstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von der Glasstange aber angezogen, und ist nach der Berührung mit dieser unelektrisch. Daraus ergeben sich folgende Grundgesetze:

1. **Gleichnamige Elektricitäten stoßen einander ab.** 2. **Ungleichnamige Elektricitäten ziehen einander an.** 3. **Ungleichnamige Elektricitäten in einem Körper neutralisiren einander.**

Die Neutralisation findet nur dann statt, wenn die El. gleich stark sind; ist die eine stärker als die andere, so bleibt von jener ein Theil übrig; ist z. B. in dem Versuche 4 die berührte Stelle der Harzstange stärker el. als das Kügelchen, so verhält sich dieses nicht unel., sondern wird nach der Berührung abgestoßen, aber schwächer, als wenn es unel. die Stange berührt hätte.

Zur Erkennung dieser wichtigen Grundgesetze lassen sich noch mehr Versuche machen. An einem ungedrehten Seidenfaden hängt eine hölzerne Hülse, in die man einen geriebenen Glasstab legt; derselbe wird von einem anderen geriebenen Glasstabe abgestoßen, von der Harzstange angezogen. Zwei an Fäden hängende, sich berührende Collodiumballons entfernen sich weit von einander, wenn man sie mit der Hand reibt.

Man benützt die Gesetze zur Prüfung, ob und wie ein Körper el. ist; ein Körper ist pos. el., wenn er das mit der Glasstange berührte Kügelchen abstößt, oder wenn er von der Glasstange abgestoßen wird; ein Körper ist neg. el., wenn er das mit der Harzstange berührte Kügelchen abstößt, oder wenn er von der Harzstange abgestoßen wird; ein Körper ist unel., wenn er unberührte Kügelchen weder anzieht noch abstößt, oder wenn er sowohl das glasberührte als auch das harzberührte Kügelchen anzieht. Auch hier ist die Anziehung nicht entscheidend aus später erhellenden Gründen. Man benutzt zu diesen Prüfungen häufig ein **Prüfungsscheibchen**, besonders wenn man der zu prüfenden Stelle das el. Pendel nicht nähern kann; Coulombs (1785) Prüfungsscheibchen besteht aus einer Scheibe von Rauschgold an einem Schellackstäbchen: die zu prüfende Stelle wird mit dem Scheibchen berührt und gibt diesem ihre El. ab; dieses nähert man dann dem el. Pendel. Genauer geschieht die Erkennung der El. durch das **Elektroskop**. Dasselbe besteht aus 2 neben einander hängenden el. Pendeln, die an einem isolirten Metallstabe befestigt sind, der ihnen die El. zuführt und gewöhnlich oben mit einem Knopfe endigt; zum Schutze vor Luftzug u. s. w. sind die Pendel in ein Glasgehäuse eingeschlossen. Bei Franklins Elektroskop waren die Pendel 2 Leinenfäden, Canton spannte dieselben durch Korkkügelchen. Saussure nahm 2 Silberdrähte mit Kügelchen von Hollundermark, Volta ersetzte dieselben durch 2 Strohhalmschnitte und Bennet durch schmale Streifen von Blattgold; Carl nimmt 2 Aluminiumdrähte mit Hollunderkugeln. Berührt man den Metallknopf mit einem el. Körper, so geht die El. auf beide Pendel über, und diese stoßen einander ab; hierdurch kann man nicht blos erkennen, daß der Körper el. ist, sondern man hat auch ein allerdings sehr ungenaues Urtheil über die Stärke der El. an der Größe der Pendeldivergenz; deßhalb sind manche Elektroskope mit Gradbögen versehen und gelten dann als (sehr ungenaue) **Elektrometer**.

Die Art der El. erkennt man folgendermaßen: man berührt den Knopf mit der geriebenen Glasstange und dann mit dem zu prüfenden Körper oder dem Prüfungsscheibchen; gehen ie Pendel noch weiter aus einander, so ist der Körper pos., gehen sie zusammen, so ist er ieg. Man kann demnach das Elektroskop auch zum Nachweise der Grundgesetze 1. und 3. ennutzen. Statt den Knopf des Elektroskops zu berühren, kann man auch durch blose Annäherung wirken; diese Wirkung ist aber von der angeführten sehr verschieden und kann erst päter erklärt werden.

Die Größe der elektrischen Anziehung und Abstoßung (Coulomb 1785). **468** Wenn zwei materielle Punkte el. sind, so ziehen sie sich an oder stoßen sich ab, proportional dem Producte der auf beiden vorhandenen Elektricitätsmengen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abtandes. Dieses Gesetz wurde mittels Coulombs el. Drehwage aufgefunden.

Der Begriff der Elektricitätsmenge oder der Quantität von El. wird durch folgende Betrachtungen nahe gelegt: Wird eine isolirte el. Metallkugel mit einer gleichen unelektrischen n Berührung gebracht, so geht durch Mittheilung von der ersten zur zweiten soviel El. iber, bis beide gleich stark el. sind; jede enthält dann halb soviel El., als die erste anfänglich enthielt; die Quantität der El. auf jeder Kugel ist halb so groß, als die Quantität anfänglich auf der ersten war. Enthält die eine Kugel eine größere Menge von El. als die andere, so geht ein Theil der El. von der ersteren auf die zweite über, bis beide gleiche Quantitäten enthalten. Sind beide Kugeln schon anfänglich gleich stark geladen, enthalten ie gleiche Quantitäten, so findet keine Mittheilung statt. Hierbei ist immer vorausgesetzt, daß beide Kugeln dieselbe Art von El. enthalten; ist aber die eine pos. und die andere gleich tark neg., so werden sie durch Mittheilung unel.; die gleichen Quantitäten entgegengesetzter El. heben einander auf. Wenn aber die eine Kugel eine größere Quantität pos. El. enthält, als die andere neg. El. enhält, so bleibt nach der Berührung der Ueberschuß positiver El. gleichmäßig auf beide vertheilt zurück, während im umgekehrten Falle die überschüssige Quantität neg. El. zurückbleibt. Werden die durch Reibung zweier Körper entstandenen El. wieder zusammengebracht, so neutralisiren sie sich; durch Reiben entstehen also gleiche Quantitäten positiver und negativer Elektricität.

Coulombs el. Drehwage war wie die magn. eingerichtet; nur mußten alle Elemente viel empfindlicher sein, weil die hier verwendbaren el. Kräfte sehr klein sind; der Faden muß ehr fein und leicht, der Wagebalken ein dünnes Schellackstäbchen oder ein mit Schellack überzogener Glasfaden sein, der an einem Ende ein vergoldetes Kügelchen von Hollundermark und am anderen Ende ein kreisförmiges Glimmerblättchen als Gegengewicht trägt. Der Deckel hat zwei seitliche Durchbohrungen, die eine zur Einführung einer der Wagbalkenkugel ganz gleichen Standkugel, welche jene im ungedrehten Fadenzustande berührte. Die andere zur Einführung der El. mittels eines Probescheibchens oder einer ähnlich construirten Prüfungskugel, mittels deren die Standkugel einen Augenblick berührt wurde. Die Balkenkugel wurde bei einem von Coulombs Versuchen um 36° abgestoßen; dann wurde oben am Torsionsknopfe so lange rückwärts gedreht, bis die Ablenkung nur noch 18° betrug, wozu eine Drehung von 126° nöthig war; die Abstoßung hielt dann dieser Torsion und der noch bestehenden Ablenkung von 18°, also einer Torsion von 144° das Gleichgewicht, während sie n der doppelten Entf. von 36° nur der Torsion von 36° das Gleichgewicht hielt, womit der zweite Theil des obigen Gesetzes bewiesen war. Coulomb hat es in ähnlicher Art auch ür die Anziehung, sowie auch nach der Methode der Schwingungen nachgewiesen. — Leicht st der Nachweis des ersten Theiles des Gesetzes: man elektrisire die zwei Kugeln wie vorhin und verwinde dann den Draht rückwärts, so daß die Ablenkung des Stabes 30° betrage; ie hierzu nöthige Torsion sei 120°, so ist die Abstoßung gleich der Torsion von 150°. Dann bringe man durch das zweite Loch eine ganz gleiche unel. Kugel mit der Standkugel n Berührung, so verbreitet sich die El. auf beide Kugeln in ganz gleicher Menge, und die Standkugel hat nur noch die Hälfte ihrer El.; die bewegliche Kugel nähert sich dann mehr der festen; um sie auf die alte Stellung zu bringen, muß man die Torsion nach rückwärts vermindern; dieselbe beträgt dann nur noch 45°; folglich ist jetzt die Abstoßung gleich einer Torsion von 75°. Da die Entf. in beiden Fällen dieselbe, und da die Abstoßungen sich wie 150 : 75, die Elektricitätsmengen wie 1 : 1/2 verhalten, so verhalten sich die Abstoßungen wie die Elektricitätsmengen, womit der erste Theil des Gesetzes dargethan ist.

Elektrische Maßbestimmungen (Weber 1846). Die absolute Einheit (460.) **469** der Elektricität ist diejenige Menge von El., welche eine gleiche Quantität in der Entfernung 1 mit der absoluten Krafteinheit abstößt. Bei Gauß u. Weber ist die absolute Krafteinheit 1 mg-mm-sec; hier ist also die Einheit der El. diejenige Menge von El., welche auf eine gleiche Menge die Abstoßung von 1 mg-mm-sec

ausübt; W. Thomsen legt seiner elektrischen Einheit die Krafteinheit g-cm-[illegible] zu Grunde und die British Association die Krafteinheit g-m-sec. Am [illegible] gebräuchlich ist die Elektricitätseinheit, bei welcher die Masseneinheit $= 10^{-[illegible]}$ $= 10^{-8}$mg und die Längeneinheit der Erdquadrant $= 10^{7}$m $= 10^{10}$mm [illegible] diese Elektricitätseinheit $= 10^{5}$ B. A. Einheiten $= 10^{8}$ Thomson'schen Einheiten $= 10^{11}$ Gauß-Weber'schen Einheiten.

Bekanntlich ist die Geschw. abhängig von Weglänge und Zeit, sie ist eine [illegible] von Länge und Zeit $= l/t = lt^{-1}$; man sagt daher auch: die Geschw. ist von der [illegible] lt^{-1}. Die Acceleration $a = c/t = lt^{-1}/t = lt^{-2}$, und die Kraft $= ma = mlt^{-2}$. [illegible] ist die Abstoßung zweier Elektricitätsmengen ε und ε_1 in der Entf. l nach dem [illegible] in 468. $= \varepsilon\varepsilon_1/l^2$; also ist $\varepsilon\varepsilon_1/l^2 = mlt^{-2}$. Soll nun ε die absolute Einheit [illegible] so muß $\varepsilon_1 = \varepsilon$ sein, also besteht die Gl. $\varepsilon^2 = ml^3t^{-2}$, woraus $\varepsilon = m^{1/2}l^{3/2}t^{-1}$, die [illegible]tätsmenge ist von der Dimension $m^{1/2}l^{3/2}t^{-1}$, z. B. nach Gauß und Weber $mg^{1/2}mm^{3/2}[illegible]$, nach Thomson $g^{1/2}cm^{3/2}sec^{-1}$ u. s. w., woraus sich die obigen Verwandlungszahlen [illegible].

Die Dichte der Elektricität ist die Quantiät der Elektricität [illegible] Flächeneinheit, gewöhnlich auf 1 qmm, wird also gefunden, indem man die [illegible] Quantität durch die Größe der Oberfläche dividirt.

Da eine Fläche von der Dimension l^2 ist, so ist die Dichte von der [illegible] $m^{1/2}l^{3/2}t^{-1} / l^2 = m^{1/2}l^{-1/2}t^{-1}$.

Zur ungefähren Vergleichung der Elektricitätsmengen dienen Henleys Quadrantelektrometer (1774), Behrens (1806) und Bohnenbergers Säulenelektrometer (1815), [illegible] zur Erkennung geringer Elektricitätsmengen geeignet sind; zur genaueren Vergleichung und absoluten Maßbestimmung dienen Coulombs Drehwage, besonders in der verbesserten [illegible] von Dellmann (1842) und Kohlrausch (1847), sowie Kohlrauschs Sinuselektrometer (18[illegible]). — Henleys Quadrantelektrometer besteht aus einem Metallstabe, der einen [illegible] Halbkreis trägt, um dessen Mittelpunkt sich ein elektrisches Pendel dreht; der Stab [illegible] eine Oeffnung des el. Körpers gesetzt, wird dadurch wie auch das Pendel elektrisch [illegible] dasselbe ab; die Größe des Erhebungswinkels gibt ein Urtheil über die Stärke der El., [illegible]sonders im Vergleiche mit der el. Stärke desselben Apparates zu anderer Zeit, oder [illegible] anderer Apparate, auf welche dasselbe Instrument gesetzt wird. — Bohnenbergers Säulenelektrometer macht eine Anwendung von Zambonis Säule, einem Apparat, der [illegible] erklärt wird, und dessen beide Enden Jahre lang pos. und neg. el. bleiben; diese Säule [illegible] findet sich in einem Glaskasten, und von ihren Enden gehen Drähte aus, die [illegible] einander gegenüber stehenden Messingscheibchen endigen, welche durch Schrauben [illegible] mehr oder weniger einander genähert oder von einander entfernt werden können. [illegible] diesen Messingscheibchen hängt in einem zweiten auf dem ersten sitzenden Glasg[illegible] Goldblättchen, das mittels eines Metallstäbchens durch den Hals der Glasglocke an [illegible]tallkugel oder Platte geht. Wird nun dieser Kugel eine noch so schwache El. [illegible] so geht diese auf das Goldblättchen, wird von der einen Scheibe angezogen und [illegible] anderen abgestoßen, da dieselben entgegengesetzt el. sind, und es entsteht hierdurch [illegible]wegung des Blättchens; bewegt sich dasselbe nach dem pos. Scheibchen hin, so war [illegible] getheilte El. neg. und umgekehrt. Je nach der Entf. der Scheibchen von einander [illegible] Stärke der Bewegung des Blättchens ist auch ein Urtheil über die Stärke der El. [illegible] — Will man eine genauere el. Vergleichung mittels Coulombs Drehwage vornehmen, so gibt man der Standkugel und der beweglichen Kugel dieselbe Art von El., wodurch [illegible]selben sich von einander entfernen; durch Torsion z. B. von 70° vermindert man die [illegible]lenkung z. B. bis auf 20°, so ist die Abstoßung = 90° Torsion. Nun gibt man der Stand[illegible]kugel die zu prüfende El., so wird die Drehkugel weiter abgestoßen; es seien außer der [illegible] Torsion noch 180° nöthig, um die Drehkugel wieder auf 20° Ablenkung herabzubringen, [illegible] ist jetzt die Abstoßung = 270° Torsion. Da die Entf. in beiden Fällen dieselbe ist, [illegible]halten sich die Abstoßungen nur wie die Elektricitätsmengen, also umgekehrt diese [illegible] wie die Abstoßungen, wie 90 : 270, wie 1 : 3. Mit Coulombs Drehwage können nur [illegible] Mengen verglichen werden; daher ist sie für El. von geringer Dichte nicht brauchbar. — Dellmanns Elektrometer besteht aus einer feinen, an einem Coconfaden hängenden [illegible]nadel, die sich mit ihrer Mitte in den Ausschnitt eines Streifens von Silberblech [illegible] dessen beide Hälften etwas links und rechts vom Ausschnitte gebogen sind, so daß [illegible] mit ihrer einen Hälfte sich an die eine Seite, mit der anderen an die andere Seite [illegible] Bügels lehnt. Der Bügel wird von einem Messingdrahte getragen, der isolirt durch [illegible] Seite des Glasgehäuses geht und außen mit einem Knopfe oder einer Platte endigt. Kohlrausch hat dieses Instrument für feinste Messungen umgestaltet. R. Kohlrauschs Si[illegible]

ıuselektrometer, welches besonders rasche Vergleichungen gestattet, besteht aus einer frei n einem Gehäuse auf einer Spitze schwebenden langen Magnetnadel, welche zu einem Mes- ingbügel in demselben Verhältnisse steht wie die Silbernadel in Dellmanns Instrument. Bird diesem El. mitgetheilt, so wird die Nadel abgestoßen, und da ihr Drehungsmoment = mP sin φ, worin φ den Ablenkungswinkel bedeutet, so hat man aus dem Sinus des Ablenkungswinkels ein Urtheil über die Stärke der El. Für feinste Messungen schwacher adung wird W. Thomsons Quadrantenelektrometer (1872) besonders empfohlen; wie in er Drehwage hängt an einem feinen Platindraht wagrecht eine äußerst dünne Aluminium- amelle, welche durch Verbindung mit dem inneren Beleg einer el. Flasche beständig schwach ge- aden ist; weiter unten hängt an ihr und dreht sich mit ihr ein Spiegel, dessen Drehung durch Fernrohr und Skale beobachtet wird. Umgeben ist die Nadel von 4 kreuzweise verbundenen Messingquadranten; wird dem einen Quadrantenpaar El. mitgetheilt, so lenkt dieselbe die Lamelle ab, und aus der Ablenkung ist die Stärke er El. zu finden. In Fig. 283. sind die Form und Stellung der Aluminiumnadel N zu den Quadrantenpaaren AC und BD und die Art der Verbindung der letzteren zu erkennen.

Fig. 283.

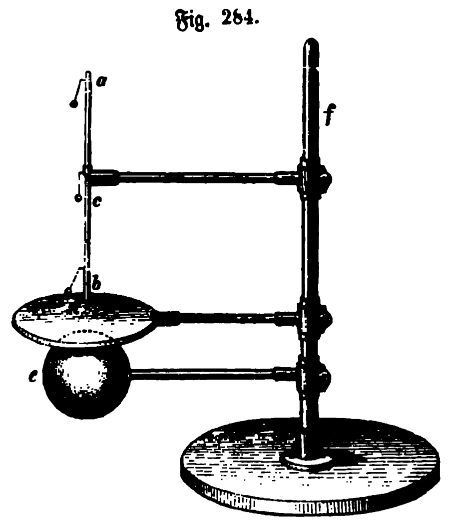
470 **Schwächung des elektrischen Zustandes mit der Zeit** (Coulomb 1785). Selbst die trockenste Luft ist kein absoluter Nichtleiter; die inen el. Körper umgebende Luft wird daher all- mälig gleichnamig el., wird dadurch von dem el. Körper abgestoßen und entfernt so einen Theil der El., was sich immerfort wiederholt; diesen Vor- gang nennt man Zerstreuung durch die Luft. — Außer der Zerstreuung von El., der Abgabe an die Luft, findet auch noch eine Abgabe von El. an die Isolatoren statt, die den el. Körper tragen oder stützen, der sogenannte Stützenverlust. Diese abgegebene El. bildet auf dem Iso- ator eine Schicht, deren Dichte mit der Entf. immer kleiner und endlich gleich Null wird; befinden sich erst jenseits dieses Nullpunktes leitende Körper, so verliert der el. Körper außer dieser Schicht keine El.; ist aber ein solcher Leiter vorhanden, wie z. B. eine Wasser- oder Staubschicht bis zur Verbindung mit der Erde, so findet eine fortdauernde Ausströmung tatt; oft ist auch durch eine nicht erkennbare Veränderung der Oberfläche eine solche ab- eitende Oberflächenschicht entstanden; daher ist ein Schellacküberzug über die Stützen sehr chützend. Sehr gute Dienste leisten die Stützen von Hartgummi, die in letzter Zeit viel- ach zur Verwendung kommen, für welche indeß noch Erfahrungen abzuwarten sind.

Nach neueren Untersuchungen von Warburg (1872) ist der Stützenverlust anfangs bedeutend größer als der Luftverlust, nimmt aber bei fortschreitender Ladung der Isolatoren immer mehr ab, und ist in dem endlich eintretenden stationären Zustand bedeutend kleiner als der Luftverlust. Für diese Zerstreuung hat schon Coulomb folgende Formel gegeben: $Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{2}p \cdot t}$, worin e die Basis der natürlichen Logarithmen bedeutet, Q_0 die an- fängliche El. auf dem Leiter, Q die El. nach der Zeit t, und 2p die Zeit, nach welcher die El. nur noch den eten Theil von Q beträgt. Hierin ist ausgesprochen, daß die Zeit, nach Ablauf derer die Ladung auf einen aliquoten Theil ihrer Größe reducirt ist, einen constanten Werth hat. Diese Gesetze wurden von Warburg bestätigt. Außerdem aber fand derselbe, daß die Zerstreuung in trockenem Kohlendioxyd ungefähr ebenso groß, in Wasserstoff aber nur halb so groß ist, wie in der Luft, daß ferner die Zerstreuung bedeutend mit der Dichte der Luft abnimmt, für pos. und neg. El. nicht verschieden und bei feuchter Luft nicht merk- lich größer als in trockener Luft ist.

471 **Die elektrische Influenz oder Vertheilung** (Canton 1735, Wilcke 1757, Ae- pinus 1759). Zur Erklärung der Influenz dient am besten der Vertheilungsapparat von Rieß (die Lehre von der Reibungselektricität von Peter Theophil Rieß 1853, ein klassisches Werk). Der Apparat ist in Fig. 284 abgebildet. Ein cylindrischer Messingstab ab wird vertical von einem Glasarme gehalten, der an einer Metall- hülse befestigt, längs dem Glasstabe f bewegt und daran festgehalten werden kann. Eine gleiche Befestigung und Bewegung hat die Glasscheibe d und die hohle Metallkugel e. An dem Cylinder befinden sich drei Hollundermarkkugeln an Leinenfäden, von welchen die beiden äußersten am Stabe selbst befestigt sind, der mittlere aber an einem Ringsegmente, das höher und tiefer gestellt werden kann. Es befinde sich nun die Kugel und der Cyl. etwa in einer Entfernung

von 2^cm^, und der Kugel werde pos. El. mitgetheilt. Diese kann wegen der Entfernung und der Glasscheibe unmöglich auf den Cyl. übergehen; aber dennoch ist dieser el. geworden, was sich dadurch zeigt, daß die Hollunderkugeln jetzt von dem Cyl. abgestoßen werden. Eine einfache Prüfung ergibt, daß die beiden äußersten Pendel entgegengesetzt el. geworden sind und zwar in diesem Falle das untere Pendel bei b neg. und das obere bei a pos.; denn geriebenes Glas stößt das Pendel bei a ab, geriebenes Siegellack das bei b. Hätte man die Kugel mit neg. El. versehen, so wäre das untere Pendel pos., das obere neg. geworden.

Fig. 264.



Da die Kugel von dem Cyl. durch Nichtleiter, Luft und Glas, getrennt ist, so kann die El. des Cylinders nicht durch Mittheilung entstanden sein; dies folgt auch daraus, daß die El. der Kugel durch den Versuch keine Schwächung erfährt; auch würde bei der Mittheilung das der Kugel zugewandte Ende des Cylinders wie das abgewandte dieselbe El. erhalten, wie sie die Kugel enthält, während in unserem Versuche das zugewandte Ende die entgegengesetzte El. besitzt. Der Cyl. ist also el. geworden, ohne El. zu erhalten, und zwar sind auf ihm beide El. entstanden. Hieraus folgt, daß dieselben schon vor dem Versuche in dem Cyl. vorhanden waren. Weil wir sie aber vor dem Versuche nicht wahrnehmen konnten, so mußten sie an allen Stellen in gleicher Menge vorhanden sein und dadurch nach außen eben so stark anziehend als abstoßend wirken und sich so einander aufheben. Da diese Erscheinungen in allen Körpern hervorgerufen werden können, so folgt daraus, daß in allen Körpern immer beide El. in gleicher Menge vorhanden sind und sich gegenseitig neutralisiren. Diese wichtige Folgerung steht auch im Einklange mit dem dritten Grundgesetze, nach welchem gleiche Mengen pos. und neg. El. in einem Körper sich aufheben. Hiernach erklärt sich die Wirkung an dem Apparat in folgender Weise: Der Cyl. enthält pos. und neg. El. an jeder Stelle in gleicher Menge; durch die pos. Kugel wird nach den zwei ersten Grundgesetzen neg. El. in das zugewandte Ende des Cylinders gezogen und pos. El. in das abgewandte Ende desselben gestoßen. Diese Einwirkung eines el. Körpers auf einen unel. nennt man **Vertheilung** oder **Influenz**. Die Gesetze der Influenz sind demnach:

472 1. **In jedem unel. Körper sind beide Elektricitäten an jeder Stelle in gleicher Menge vorhanden und neutralisiren einander.**

2. **Nähert man einem unelektrischen Körper einen elektrischen Körper, so zieht dieser ungleichnamige Elektricität in die zugewandte Hälfte desselben und stößt gleichnamige Elektricität in die abgewandte Hälfte.**

Beide El. die angezogene wie die abgestoßene wirken wie gewöhnliche El., nur kann die angezogene nicht fortströmen; man nannte sie daher **gebundene** und die abgestoßene **freie** El.; da aber mit dem Ausdrucke gebunden sich leicht die irrige Vorstellung verknüpft, daß die El. nicht mehr ihre sonstigen Eigenschaften

habe, oder daß sie wie in einem unel. Körper neutralisirt sei, so wendet Rieß diese Ausdrücke nicht an, er nennt Influenzelektricität erster Art die von dem erregenden Körper angezogene und Influenzelektricität zweiter Art die von dem erregenden Körper abgestoßene El.

Die beiden El. verschwinden für uns, wenn man die erregende Kugel entfernt oder durch leitende Verbindung mit der Erde entladet; hierin liegt auch noch ein Beweis für die Richtigkeit obiger Erklärung; denn dieses Verschwinden kann nur dadurch geschehen, daß gleiche Mengen von El. sich mischen, also müssen dieselben auch schon vor dem Versuche in gleicher Menge gemischt gewesen sein. Indessen kann man die El. auch vor dem Neutralisiren schützen und sie demnach erhalten. 1. Statt eines Vertheilungscylinders nimmt man zwei sich berührende Vertheilungskugeln, setzt sie der Influenz aus, und entfernt sie sodann von einander und von der influenzirenden Kugel; in der zugewandt gewesenen Kugel ist dann die Influenzel. erster Art, in der abgewandt gewesenen die Influenzel. zweiter Art. 2. Man verbindet den Vertheilungskörper leitend mit der Erde, indem man ihn z. B. mit der Hand berührt; dann geht die abgestoßene El., die nach der Erde zu vollkommen freie Beweglichkeit hat, ja durch Abstoßung noch stärker nach derselben hinbewegt wird, fort in die Erde, und es bleibt nur die angezogene El. übrig, allerdings noch nicht vollkommen frei, sondern durch die Anziehung an ihre Stelle gebunden; sie ist aber frei, sowie man den erregenden Körper entfernt oder ableitend berührt. 3. Durch die Wirkung der Spitzen s. 479.

Die Vertheilung unterscheidet sich von der Mittheilung dadurch, daß der vertheilende Körper seine El. behält, der mittheilende Körper sie aber theilweise verliert, daß bei der Mittheilung der erregte Körper nur dieselbe El. erhält, wie der erregende, bei der Vertheilung aber beide El., und endlich daß die Mittheilung nur durch einen Leiter geschieht, die Vertheilung aber gewöhnlich durch einen Nichtleiter hindurch. Indessen findet die Influenz auch durch Leiter hindurch statt; nur wird hierbei dieser Leiter ebenfalls influenzirt und die in ihm hervorgerufenen El. wirken verändernd auf den erregten Körper. Umgekehrt ist der influenzirte Körper gewöhnlich ein Leiter; aber es findet doch auch eine Influenz auf Nichtleiter statt. Bringt man ein Schellackstäbchen ganz nahe, oder, da hier von Mittheilung doch nicht die Rede sein kann, in Berührung mit einer el. Kugel, so ist das Stäbchen nach der Berührung entgegengesetzt el., nach Rieß deßhalb, weil die abgestoßene gleichnamige El. sich wegen dieser Abstoßung stärker in die Luft zerstreut, als die angezogene gebundene Influenzel. erster Art, und weil demnach das Schellackstäbchen diese letztere nach der Berührung in größerer freier Menge enthalten muß.

Nach Rieß (1873) findet sogar eine Influenz eines Nichtleiters auf sich selbst statt. Wird die obere Fläche einer wagrechten Platte elektrisirt, so findet sich auf der unteren Fläche eine Schicht gleichnamiger und unmittelbar über derselben eine Schicht ungleichnamiger El.; die gleichnamige strömt, so lange die obere Fläche geladen bleibt, leuchtend aus der unteren Fläche hinaus; wird jene aber entladen, so strömt die ungleichnamige El. leuchtend aus. Hierdurch erklären sich ältere Erscheinungen. Poggendorff stellte (1854) zwei einseitig mit Stanniol belegte Glasplatten mit den unbelegten Glasflächen einander parallel und beobachtete zwischen denselben ein lebhaftes Funkenspiel, als er die 2 belegten Flächen stark entgegengesetzt elektrisirte. Siemens steckte (1858) eine innen belegte Glasröhre in eine außen belegte und erhielt in dem unbelegten Zwischenraum viel Ozon, als die belegten Stellen fortwährend stark entgegengesetzt elektrisirt wurden. Brodie ersetzte (1872) die Belege durch leitende Flüssigkeiten und beobachtete dann in jenem Zwischenraume entweder ein Spiel kleiner Funken oder einen continuirlichen Lichtschein (éffluve électrique), der nach Thénard andere chemische Wirkungen als die Funkenentladung besitzt. An der Holtz'schen Elektrisirmaschine mit zwei rotirenden Scheiben erscheint zwischen denselben den Metallkämmen gegenüber ein hell flackerndes Licht (Rieß 1867). Eine luftleere Glasröhre, am einen Ende mit der Hand gehalten, am anderen Ende einen geladenen Conductor berührend, gibt einen wallenden Lichtstrom pos. El.; ergreift man hiernach das andere Ende, so entsteht der verschwundene Lichtstrom wieder, weil jetzt die neg. El. ausfließt (s. Dielektricität 489.).

Die zwei Influenzel. stimmen ganz mit der gewöhnlichen El. überein; sie wirken abstoßend wie diese, was schon aus der Abstoßung der kleinen Pendel hervorgeht; sie wirken anziehend, was man daraus ersehen kann, daß man neutrale oder entgegengesetzte Pendel in die Nähe des zugewandten oder abgewandten Theiles bringt. Sie wirken aber auch ver-

theilend; daß die Influenzel. zweiter Art vertheilend wirkt, kann man einfach an einen 2., 3. Vertheilungscylinder sehen, die man in einer Linie horizontal hinter einander dem abgewandten Ende des ersten, in diesem Falle auch horizontal aufgestellten Vertheilungscylinders nähert; es ist dann immer das zugewandte Ende der folgenden Cylinder ungleichnamig, das abgewandte gleichnamig el. mit dem abgewandten Theile des ersten Cylinders. Aus Versuchen von Faraday (1839) und Fechner (1841) folgt aber auch die influenzirende Wirkung der angezogenen, gebundenen Influenzel. erster Art. Legt man auf einen el. Schellackcylinder leitend mit der Erde verbundene Kugeln, so werden dieselben entgegengesetzt el.; legt man sie aber in die Mitte einer über den Schellackcylinder gelegten Scheibe, die man durch Heben oder Senken mehr oder weniger von diesem entfernen kann, so sind in einer gewissen Entf. die Kugeln trotz ableitender Berührung unel.: denn wegen der Ableitung bleibt nur die Influenzel. erster Art übrig; diese ist in der Scheibe und in den Kugeln, soweit sie vom Schellack herrührt, pos.; da nun diese pos. El. in den Kugeln aufgehoben ist, so muß die pos. Influenzel. erster Art in der Scheibe influenzirend auf die Kugeln gewirkt und diesen dadurch neg. El. gegeben haben. Es läßt sich auch leicht angeben, wie die Erscheinung sich ändern wird, wenn man die Kugeln in andere Entf. von der Scheibe bringt, und wenn man voraussetzt, daß die Influenzel. erster Art influenzirend wirkt; und da Fechner die Erscheinungen ganz so gefunden hat, wie sie dieser Voraussetzung entsprechen, so ist damit nochmals die Richtigkeit der Voraussetzung gezeigt, daß selbst die sogenannte gebundene El. influenzirend wirkt. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Influenzel. und der gewöhnlichen besteht demnach nur darin, daß die Influenzel. erster Art nicht fortströmen kann, und daß im Gegensatze hierzu die Influenzel zweiter Art ein um so größeres Fortströmungsvermögen hat, da sie von dem erregenden Körper fortgestoßen wird.

Vertheilungsapparate gibt es noch mancherlei; vor Rieß benutzte man allgemein einen längeren Metallcylinder, der wagrecht auf Glasfüßen ruhte und an verschiedenen Stellen Pendelpaare trug; durch die Divergenz derselben erkannte man die Influenz eines genäherten el. Körpers; auch ist an der Größe der Divergenz zu erkennen, daß die erregte El. von den Enden des Cylinders nach der Mitte zu abnimmt, und zwar, wie Coulomb nachwies, im umgekehrten Verhältnisse steht zu dem Quadrat der Entf. Hieraus folgt, daß eine Stelle an dem Vertheilungskörper existiren muß, wo die zwei El. in gleicher Dichte vorhanden sind und sich daher neutralisiren; diese Indifferenzzone liegt etwas von der Mitte ab nach dem influenzirenden Körper hin; sie kommt der Mitte um so näher, je weiter derselbe entfernt ist (Fechner 1841). Die Menge der Influenzelektricitäten ist proportional der Elektricitätsmenge des influenzirenden Körpers; auf einer Scheibe ist sie auch umgekehrt proportional dem Quadrat der Entf.; bei anderen Körpern wirken Form, Dimensionen und Lage auf dieses Gesetz verändernd ein (Coulomb 1788). — Die Influenz spielt bei allen el. Erscheinungen und Apparaten, die wir noch zu betrachten haben, die Hauptrolle, und gibt selbst die Erklärung von mehreren früher angeführten Erscheinungen.

473 **Erklärung el. Erscheinungen durch die Influenz.** 1. Die Anziehung neutraler Körper durch einen el. Körper. Die El. des letzteren wirkt vertheilend auf die beiden einander aufhebenden El. des ersteren, die ungleichnamige wird in das zugewandte Ende gezogen, die gleichnamige in das abgewandte Ende gestoßen. Ist nun der Abstand der beiden Körper klein, so ist der el. Körper dem zugewandten Ende merklich näher als dem abgewandten, die Anziehung überwiegt und die Körper nähern sich. Kleine Körperchen werden leichter angezogen, wenn sie auf einer ableitenden Unterlage ruhen, weil dann die gleichnamige El. abfließt. Ein Schellackkügelchen wird nicht angezogen, weil die Vertheilung in demselben nur schwer stattfindet. Leicht bewegliche, angezogene Körper stellen sich mit ihrer längeren Richtung nach dem el. Körper hin, weil so die Entf. der beiden Influenzel. am größten ist. Ebenso erklärt es sich, daß leichte und leicht bewegliche, nicht zu schwach el. Körper von unel. angezogen werden. 2. Die Mittheilung der El. Ein einem el. Körper genäherter Leiter erhält an dem zugewandten Ende die entgegengesetzte und an dem abgewandten Ende die gleiche El.; kommen nun die beiden Körper zur Berührung, so gleicht die entgegengesetzte El. einen gleichen Betrag der El. des ersten Körpers aus, es verschwindet scheinbar dieser Betrag der El. desselben, während derselbe Betrag auf dem genäherten Körper übrig bleibt und so auf denselben übergegangen zu sein scheint. Ist ein Körper stärker elektrisch als ein anderer, so muß in Betracht gezogen werden, daß jeder Körper außer seiner freien El. noch einen neutralisirten Betrag beider El. enthält. Auf diesen neutralen Betrag des schwächeren Körpers wirkt der stärkere Körper auch stärker influenzirend ein, so daß ein größerer Betrag der gleichnamigen El. schließlich auf demselben zurückbleibt. Bei der Mittheilung ist also die scheinbar mitgetheilte El. schon vorher auf demselben Körper gewesen, und die wirklich mitgetheilte El. ist auf demselben durch Neutralisation verschwunden. 3. Die Anziehung gleichnamiger Körper. Ist ein Körper sehr stark und ein anderer schwach gleichnamig el., so kann es in gewissen Entf. vorkommen, daß die von dem ersten Körper angezogene ungleichnamige El. die gleichnamige an Stärke übertrifft, dieselbe

neutralisirt und in freiem Ueberschusse vorhanden ist, wodurch dann Anziehung stattfindet. 4. Auch *bei der Entstehung der Reibungsel.* wirkt das erste Influenzgesetz mit, daß in jedem unel. Körper beide El. in gleicher Menge vorhanden sind; die Reibung hat auf allerdings unbekannte Weise den Erfolg, diese El. zu vertheilen und in dem einen Körper die positive, in dem anderen die negative zu sammeln. 5. *Wirkung der Vertheilung in Elektroskopen.* Weil bei der Annäherung eines el. Körpers an ein Elektroskop auch eine Influenz stattfinden muß, welche die Wirkung der Mittheilung stören kann, so benutzt man sicherer die Influenzwirkung. Man nähert dem Knopfe oder der Platte des Elektroskops einen el. Körper, während man die Platte berührt; dadurch geht die gleichnamige El. fort in die Erde, und die ungleichnamige bleibt in der Platte gebunden zurück, kann nicht auf die elektroskopischen Blättchen wirken, weßhalb diese unbewegt beisammen bleiben; entfernt man aber zuerst den Finger und dann den Körper, so geht diese ungleichnamige El. auf die Blättchen über und bringt dieselben zur Divergenz. — Bringt man nun einen Körper näher, der dieselbe El. besitzt wie die elektroskopischen Blättchen, so wird die Divergenz vergrößert, weil die freie noch im Knopfe befindliche gleichnamige El. zu den Blättchen hinabgestoßen und auch durch Vertheilung noch gleichnamige El. hinabgetrieben wird. Nähert man aber einen Körper mit entgegengesetzter El., so zieht dieser die El. aus den Blättchen herauf, die Divergenz wird kleiner; außerdem treibt er durch Influenz ungleichnamige El. hinab, die Divergenz wird aufgehoben, die Blättchen fallen zusammen; bei weiterer Annäherung steigt die gleichnamige El. der Blättchen über die frühere ungleichnamige und die Blättchen gehen wieder aus einander. Hieraus ist die Erkennung eines el. Körpers ohne Berührung möglich.

474 **Die Elektrisirmaschine** (Otto von Guericke, geb. 1602, gest. 1686) dient gewöhnlich zur Ansammlung einer größeren Menge einer Art von El.; diese Ansammlung geschieht in einem kugelförmigen oder cylinderförmigen und mit Halbkugeln endigenden Gefäße von Messingblech, das auf Glasfüßen ruht und Conductor genannt wird; die El. wird meistens erzeugt durch Reibung einer drehbaren, kreisförmigen Glasscheibe, des Reibers, an mit Amalgam bestrichenen und durch Federn gegen die Scheibe angedrückten Reibkissen, Reibzeug genannt. Demnach enthält eine Elektrisirmaschine drei Haupttheile: den Reiber, das Reibzeug und den Conductor. Von dem Conductor geht eine Metall-Leitung bis zu beiden Seitenflächen des Reibers und endigt diesen gegenüber mit Metallspitzen, den sogenannten Einsaugern. Durch die Reibung wird der Reiber pos. el.; diese pos. El. zieht mittels der Saugspitzen neg. El. aus dem Conductor, neutralisirt dieselbe und wird von ihr neutralisirt und läßt einen gleichen Betrag pos. El. auf demselben zurück. Durch die Fortdauer dieses Vorganges häuft sich die pos. El. auf dem Conductor immer mehr an; doch ist der Ansammlung eine Grenze gesetzt, indem der Conductor auf seiner ganzen Fläche immer mehr El. in die Luft zerstreut, je dichter dieselbe wird; ist die Menge der zerstreuten El. gleich der Menge der durch den Reiber entwickelten El., so ist die Steigerung der Ladung zu Ende.

Die jetzt gebräuchlichste Constr. der Elektrisirmaschine ist von Winter in Wien; dieselbe enthält einen kugelförmigen Conductor, der nahezu am einen Rande der Scheibe, den Reibkissen gegenüber auf einem Glasfuße steht, und mit welchem 2 Holzringe verbunden sind. In diesen Ringen sind mit Stanniol bekleidete Rinnen ausgegraben, aus welchen sich die kreisförmige Reihe von metallenen Saugspitzen erhebt, welche so durch eine Verlängerung des Stanniolstreifens bis an das metallene Verbindungsstück der Holzringe mit dem Conductor in leitender Verbindung mit demselben sind. In dem Conductor steckt ein Holzstab mit einem großen Holzringe, der einen Draht einschließt. Die Reibkissen werden von einem gabeligen Gestelle getragen, das auf einem Glasfuße befestigt ist und einen kleineren Conductor zur Ansammlung der neg. El. trägt; die Reibkissen sind Bretter mit einem amalgamirten Leder- oder Seidenüberzug; dieser setzt sich in kreisförmige Streifen von Wachstaffet fort, welche demnach die Scheibe zwischen dem Reibzeug und dem Einsauger isolirend bedecken und sie so gegen die Zerstreuung in die Luft schützen. Der Conductor hat noch eine oder zwei Oeffnungen zum Ansetzen von kleineren Kugeln oder Knöpfen. Auch steht gewöhnlich auf dem gemeinschaftlichen Fußgestell verschiebbar ein *Funkenzieher*, bestehend aus einem Metallstabe mit Knopf, von einer Glassäule getragen, und durch eine übersponnene Kette mit dem neg. Conductor in Verbindung zu setzen. Der Reiber, die Glasscheibe ist zwischen zwei runden Holzstöcken verschraubt, die eine längere, gläserne Achse tragen, welche in 2 Lagern durch eine Kurbel umgedreht wird. Will man pos. El. sammeln, so

muß man den neg. Conductor ableitend mit der Erde durch eine Kette verbinden und umgekehrt. Das Amalgam von Kienmayer, bestehend aus 2 Th. Quecksilber, 1 Th. Zinn und 1 Th. Zink, wird gepulvert und mittels Fett auf das Leder gestrichen.

Armstrong entdeckte (1840), daß der aus einem Dampfkessel ausströmende Dampf pos., der Kessel selbst neg. el. werde, und daß diese El. durch Reibung des Dampfes entstehe; Faraday (1844) zeigte, daß dies nur mit feuchtem, Wassertheilchen fortführenden Dampfe geschehe. Armstrong construirte hiernach seine Hydroelektrisirmaschine.

475 **Versuche mit der Elektrisirmaschine.** 1. Die elektrische Anziehung und Abstoßung zeigen:

a. Der Korkkugeltanz; ein Glasgefäß mit metallenem Boden und Deckel enthält Korkkugeln, wird auf den leitenden Boden gesetzt, und durch eine Metallstange wird der Deckel mit dem Conductor verbunden; dann tanzen die Kugeln auf und ab. Der Leser versuche selbst die Erklärung. Aehnlich ist der Puppentanz, der el. Regen und andere Spielereien. b. Das el. Glockenspiel. Eine Glasstange trägt einen wagrechten Messingstab und an diesem eine Glocke mittels eines Metalldrahtes und zwei Glocken mittels seidener Schnüre; von diesen zwei Glocken gehen leitende Ketten zum Boden herab, und zwischen den Glocken hängen an Seidenfäden kleine Klöpfel, die sich hin- und herbewegen, wenn der Messingstab mit dem Cond. verbunden wird; der Leser erkläre die Erscheinung. c. Der el. Büschel; auf einem leitenden Stäbchen sitzt eine Scheibe mit Papierstreifen; wird dieselbe mittels eines Korkes auf den Cond. gesetzt, so gehen die Streifen wie ein Schirm auseinander; ebenso schwillt eine Flaumfeder auf dem Cond. an; ebenso sträuben sich die Haare eines auf einem Isolirschemel oder in Gummischuhen stehenden Menschen, der die Hand auf den geladenen Cond. legt. Das Spinnwebengefühl bei Annähern des Gesichtes oder der äußeren Handfläche an den Cond. d. Der el. Wasserstrahl von A. Fuchs. Verbindet man mit dem geladenen Cond. das Wasser in einem Trichter, der eine sehr dünne Ausflußröhre hat, so wird das ausfließende Wasser ein continuirlicher Strahl, wenn es vorher in Tropfen floß, und es löst sich in Tropfen auf, wenn es continuirlich floß. Ein steigender Wasserstrahl zeigt nach Abendroth (1874) drei el. Erscheinungen bei Annäherung eines el. Körpers: die Attraction, eine Hinneigung des Strahles zu dem Körper, die Contraction, das Aufhören des Perlenregens und der Spritztröpfchen, und die Displosion, das Zerstäuben in seitliche, lang gestreckte, tief liegende Parabeln. Die Contraction findet schon durch schwache, die Attraction und die Displosion durch stärkste genäherte El. statt, Contraction und Displosion auch durch mitgetheilte El. Bei angenäherter El. wird der Strahl ungleichnamig, das Reservoir gleichnamig, wodurch sich die Attraction erklärt. Die Displosion entsteht durch die Abstoßung der gleichnamig el. Theilchen eines Tropfens. Die Contraction erklärt Abendroth durch die Aufhebung der Rotation in den länglichen Tropfen.

476 2. Der elektrische Funke. Nähert man die Hand dem geladenen Cond., so springen knallende und stechende Funken auf dieselbe über; dasselbe zeigt sich beim Annähern eines anderen Leiters; auch jedem anderen Leiter, z. B. dem menschlichen Körper lassen sich Funken entziehen, wenn man denselben isolirt, z. B. auf dem Isolirschemel stehend, mit dem Cond. in leitende Verbindung setzt. Viel zahlreicher sind die Funken, wenn man den Funkenzieher mit dem neg. Cond. verbindet und den Knopf desselben dem Cond. nähert; hieraus läßt sich schließen, daß beim Funken die neg. El. mitwirkt. Zu näherer Prüfung unterbricht man die Drehung der Maschine, wenn die beiden Cond. geladen und mit el. Pendeln versehen sind, und bringt dann den Knopf des Funkenziehers in die Nähe des pos. Cond.; man findet dann nach dem Ueberspringen des Funkens die beiden Conductoren großentheits entladen, was besonders aus dem Zusammenfallen der el. Pendel folgt. Hieraus muß man schließen, daß mit dem Funken eine Ausgleichung der beiden El. durch die Luft hindurch verbunden ist; der Funke entsteht, wenn die beiden einander nahe stehenden El. stark genug sind, die schlechte Leitung, den Leitungswiderstand der Luft zu überwinden; der elektrische Funke ist die Vereinigung der beiden Elektricitäten durch die Luft; die hierdurch hervorgerufene Erschütterung der Luft und des Aethers erzeugt das Auftreten von Schall, Wärme und Licht. Die Entstehung des Funkens beim Annähern eines unel. Leiters z. B. des Fingers an einen el. Körper ist hiernach eine Influenzwirkung; die z. B. pos. El. des Conductors zieht in das zugewandte Ende des genäherten Leiters neg. El. und stößt pos. El. in die Erde. Ist die Dichte der ge-

einander gegenüberstehenden El. so groß, daß ihre Anziehung den Widerstand der Luft überwinden kann, so findet die Vereinigung durch die Luft, der elektrische Funke statt. Entsteht der Funke nicht, so muß man den Finger mehr nähern; hierdurch wird der Widerstand geringer, die Influenzel. und die Anziehung stärker, so daß der Funke entstehen kann. Ist der genäherte Leiter isolirt, so bleibt die abgestoßene gleichnamige El. nach der Funkenbildung in dem isolirten Leiter zurück; die Wirkung ist also dieselbe, als ob mit dem Funken diese gleichnamige El. übergesprungen wäre; man darf daher wohl zur Abkürzung sagen: mit einem Funken springt auf einen isolirten Körper gleichnamige Elektricität über.

Hierdurch erklären sich die Erscheinungen der Blitzröhre, Blitztafel u. s. w.; diese bestehen aus Glasröhren, Glasscheiben u. s. w., welche mit Stanniolrauten so bekleidet sind, daß jede Raute isolirt ist, aber der Spitze der folgenden sehr nahe kommt; nähert man die erste Raute dem geladenen Cond., so daß auf dieselbe ein Funke überspringt, so springt derselbe fast gleichzeitig an allen Unterbrechungsstellen über, wodurch die Namen sich erklären. Auf gleiche Weise mögen sich auch das Büschellicht und das Glimmlicht erklären; es gibt nämlich außer dem Linienfunken noch 2 Arten elektrischer Lichtentladung, das Büschellicht und das Glimmlicht; der elektrische Funke ist eine weißleuchtende gerade oder zickzackförmige Linie, das Büschellicht ist ein Bündel violetter Strahlen, das Glimmlicht ein ruhig schwebendes Sternchen oder Flämmchen; die beiden letzten Arten sind nur im Dunkeln gut sichtbar. Das Büschellicht entsteht bei sehr starker Ladung, z. B. mit der starken Masch. von Van Marum, an Conductorstellen von großer el. Dichte, oder auch am Ende eines auf den Cond. gesetzten zugespitzten Holzstücks oder abgerundeten Drahtes. Auch das elektrische Ei liefert eine solche Erscheinung: es ist ein elliptisches, luftverdünntes Glasgefäß, in welchem an den Scheiteln zwei leitend nach außen führende Knöpfe verschoben werden können; hält man den Leitungsdraht des einen Knopfes so an den Cond., daß fortwährend Funken überspringen, so erfüllt sich das Ei mit einer prachtvoll violetten Strahlengarbe. Das Glimmlicht oder Spitzenlicht schwebt auf jeder Spitze des Cond., ja erscheint überall, wo Spitzen an el. Körpern vorkommen, selbst an mit einem Ebonitkamm gekämmten trockenen blonden Haaren. Alle drei Lichtarten finden sich in der freien Natur: der Linienblitz ist ein el. Funke, der Flächenblitz Büschellicht, das St. Elmsfeuer Glimmlicht.

Am elektrischen Funken sind zu betrachten: die Schlagweite, d. i. die Entfernung des Leiters vom Conductor, in welcher der Funke überspringt, sodann die Gestalt, die Dauer, die Farbe und das Spectrum des Funkens. — Die Schlagweite ist unter sonst gleichen Umständen der el. Dichte des Cond. proportional; da, wie wir später sehen werden, die el. Dichte mit der Krümmung zunimmt, so erhält man die längsten Funken an einem dünnen Theile des Cond. oder an eingesetzten stark gekrümmten Knöpfen. Eine Winter'sche Maschine mit einer Scheibe von 40″ Durchm. gibt 24″ lange Funken; Winter gibt an, daß die von ihm umgebaute Maschine der polytechnischen Schule zu Wien Funken von 40″ Länge ermöglicht. Die Funkenlänge oder Schlagweite hängt außer der el. Dichte noch ab von der Natur und Dichte der Luft, ist um so größer, je dünner die Luft ist, und für verschiedene Gase verschieden. — Die Gestalt des el. Funkens ist an sich die eines leuchtenden Punktes, der den Weg vom Cond. zu dem genäherten Leiter sucht; da der Eindruck vom Anfange dieses Funkenweges noch im Auge haftet, wenn der des Endes schon dazu gekommen ist, so erscheint gleichzeitig die ganze Funkenbahn erleuchtet; ist die El. sehr dicht und der Weg kurz, so ist die Funkenbahn geradlinig; die vom Cond. ausspringenden längeren Funken dagegen haben Zickzackformen, von deren Scheiteln Funkenäste aussprühen; diese Zickzackform erklären Manche dadurch, daß der Funke die Luft vor sich verdichte, diese hierdurch zu einem schlechteren Leiter mache, und seinen Weg durch die nebenliegende dünnere Luft nehme. — Die Dauer des el. Funkens beträgt nach Wheatstone (1834) weniger als eine Milliontel Secunde, so daß alle bewegten Körper, eine schwingende Saite, ein Wasserstrahl, Zeichnungen auf einem rotirenden Kreisel in Ruhe erscheinen, wenn sie nur von dem Funken beleuchtet sind; s. 488. — Die Farbe und Helligkeit des el. Funkens ist verschieden; am hellsten weiß ist der kurze, geradlinige Funke der el. Flasche; sonst hängt die Farbe von dem Metalle der Leiter ab, zwischen denen der Funke überspringt, so wie von der Beschaffenheit des Gases, durch welches der Funke geht; je dichter das Gas ist, desto mehr nähert sich die Farbe dem Weiß; in verdünnter Luft ist der Funke bläulich weiß, in Stickgas violett, in Wasserstoff hochroth, in Kohlendioxyd grün. Man hält das Leuchten für eine Gluth der Gas- und der mitgerissenen Metalltheilchen; dieses Mitreißen erhellt aus dem allmäligen Rauhwerden einer Funkenstelle, aus dem Ueberziehen einer anderen mit einer dünnen Metallschicht des anderen Leiters u. s. w. Das Spectrum der el. Entladung s. 317.

3. Wärmewirkungen. Die Wärme, welche ein el. Funke enthält, bringt nicht blos

die Gas- und Metalltheilchen desselben zum Glühen, sondern kann auch zum Entzünden gebraucht werden, jedoch nur für die leichtentzündlichsten Stoffe. Schwefeläther, warmer Alkohol, Phosphor und Harzstaub in einer metallnen Schale dem Cond. genähert, entzünden sich beim Ueberspringen des Funkens. Füllt man eine Blechröhre mit Knallgas und läßt mittels zweier hineinragenden Drähte einen Funken durch dasselbe springen, so entsteht ein Knall: el. Pistole. Hierauf beruht Voltas Eudiometer und die ältere Zündmaschine. Diese Wirkungen sowohl, wie die physiologischen und chemischen, treten stärker bei der el. Flasche auf, werden also dort näher betrachtet. Von den chemischen Wirkungen sei nur erwähnt die Bildung des Ozons, dessen eigenthümlicher, an Schwefeldioxyd erinnernder Geruch sich bei längerem Arbeiten an einer Elektrisirmaschine allmälig verbreitet und besonders stark an einer auf den Cond. gesetzten Spitze wahrgenommen wird.

477 4. Sitz der Elektricität. Die beiden Bestandtheile der neutralen El. mögen wohl auch im Inneren eines Leiters gleichmäßig vertheilt sein; freie El. dagegen findet sich nur auf der Oberfläche der Leiter, weil die einzelnen Theilchen des elektrischen Fluidums sich, wenn sie im Inneren wären, einander so weit fortstoßen würden, bis sie an einer schlechten Leitung einen Widerstand fänden; dies ist aber nur an der Oberfläche eines Leiters der Fall, weil hier der Widerstand der Luft der Fortbewegung eine Grenze setzt.

Fig. 285.



Coulomb (1788) fand, daß die Ladung einer Standkugel seiner Drehwage in derselben Stärke durch eine massive und durch eine Hohlkugel geschwächt wird. — Stellt man eine Metallkugel auf eine isolirende Stütze, umgibt sie sodann mit zwei anschließenden Halbkugeln von Blech, die man an isolirenden Handhaben hält, und elektrisirt das Ganze durch Berührung mit dem Cond., so sind nach dem Abheben der Halbkugeln wohl diese, nicht aber die Kugel el.; ja sogar wenn man zuerst die Kugel elektrisirt und dann die Halbkugeln aufsetzt, zeigen sich nur diese el., die Kugel selbst aber unel.; alle El. ist auf die Halbkugeln übergegangen. — Eine elektrisirte Hohlkugel mit Oeffnungen gibt auf ihrer Außenfläche dem Probescheibchen starke, auf der Innenfläche keine El. — Faraday (18[illegible]) fertigte eine große Kammer aus Holzstäben mit Drahtnetz überzogen, das mit Papier und dann mit Stanniol bekleidet war; wurde die Kammer von außen noch so stark elektrisirt, so konnte Faraday selbst mit den feinsten Elektroskopen im Inneren keine Spur von El. entdeken. — Faraday elektrisirte ein Drahtnetz (Fig. 285) von der Form eines Schmetterlingsnetzes und fand die Außenfläche mittels des Prüfungsscheibchens stark, die Innenfläche gar nicht el.; stülpte er durch Ziehen an einem Faden, der an den Boden des Netzes befestigt war, dasselbe um, so zeigte sich die jetzige äußere, vorher ganz unel. Innenfläche stark el., die jetzige innere, vorher stark el. Außenfläche dagegen unel. — Magnus hing eine Messingrolle an 2 Fortsätzen an Seidenfäden auf und wickelte um die Rolle ein Metallblatt, das an seinem losen Ende ein Doppelpendel und einen isolirten Handgriff trug; wurde die Rolle elektrisirt, so gingen beim Aufziehen derselben die beiden Pendel stark zusammen, divergirten aber bei dem alsdann erfolgten Zusammenrollen wieder immer mehr.

478 5. Vertheilung der Elektricität auf Leitern; Wirkung der Spitzen (Coulomb 1787, Poisson 1811, Rieß 1853). Aus einer ebenen Oberfläche kann die Elektricität nicht ausfließen, weil (Fig. 286a) hinter den Oberflächentheilchen keine Theilchen des Fluidums mehr vorhanden sind, die auf jene hinaustreibend wirken; nur nach den Grenzen der Fläche zu kann die El. durch

ihre eigene Abstoßung bewegt werden; aus ebenen Flächen tritt also die El. nicht
n der Fläche selbst, sondern an den Grenzen derselben; die el. Dichte ist in der
Mitte am kleinsten, am Rande am größten. Auf krummen Flächen ist aber durch
ie Abstoßung einer Anzahl von el. Theilchen auf eines derselben eine gegen das
Flächenelement dieses Theil-
chens gerichtete Resultante vor-
handen, welche dieses Theil-
chen b oder c aus der Fläche
hinauszustoßen bestrebt ist;
iese Resultante ist um so grö-
ßer, je spitzer der Winkel der
bstoßenden Kräfte, je stärker
ie Krümmung ist. Auch die
elektrische Dichte ist auf krum-
men Flächen um so größer, je

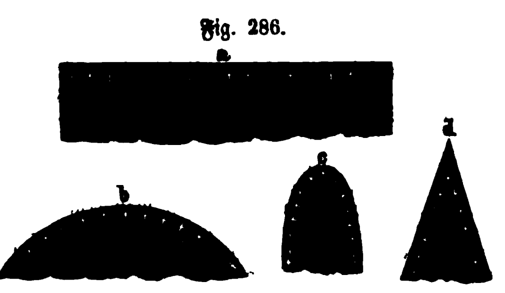


Fig. 286.

stärker die Krümmung ist. Ist die Krümmung überall dieselbe wie bei einer Kugel,
o ist auch die el. Dichte überall dieselbe; an elliptischen und eiförmigen Körpern
st die Dichte an den Scheitelenden am größten; bei einem Cylinder, der mit
Halbkugeln endet, ist sie an diesen Halbkugeln am größten. Eine Spitze hat un-
endlich kleine Krümmungsradien, also ist die el. Dichte und das Ausströmungs-
vermögen an mathematischen Spitzen unendlich groß, bei den wirklichen Spitzen
nur außerordentlich groß; nach einer Spitze d hin wird von allen Elementen der
Fläche, deren Auslauf die Spitze bildet, die El. hingetrieben. Kanten haben nur
nach einer Richtung unendlich kleine Krümmungsradien, nach anderen nicht; folg-
lich ist die Ausströmung zwar stark, aber nicht so groß wie bei den Spitzen.

Coulomb hat die Sätze für Kugeln, Ellipsoide und andere Körper mittels eines Prü-
fungsscheibchens und der el. Drehwage nachgewiesen; Rieß benutzte gepaarte Prüfungsscheib-
chen und gab die Zunahme der Dichte genau in Zahlen an. Poisson suchte die ganze Sache
mathematisch zu ergründen, indem er den Satz zu Grunde legte, daß die Wirkung der Ober-
fläche eines Körpers oder einer Anzahl von Körpern auf einen Punkt im Inneren gleich
Null sein muß. Aus den angegebenen Sätzen erklärt sich, warum man als Cond. Kugeln
oder mit Halbkugeln geschlossene Cylinder anwendet, und warum an ihnen alle Spitzen und
Kanten vermieden sein müssen. Setzt man auf den Cond. einer Elektrisirmaschine eine
Spitze, so ist es unmöglich, eine Ladung zu Stande zu bringen; alle El. strömt aus der
Spitze mit Glimmlicht hinaus; da demnach die umliegende Luft gleichnamig el. wird, so
wird sie von der Spitze abgestoßen, es entsteht ein lebhafter Luftstrom, der el. Wind,
der deutlich sichtbar wird, wenn man eine Kerzenflamme nähert. Verbindet man den Cond.
mit einem aufrechten Leiter, auf dessen Spitze leicht drehbar eine S-förmige Platte, an den
Enden zugespitzt, schwebt, oder ein Rädchen aus umgebogenen zugespitzten Drähten gebildet,
so wird dasselbe durch die Abstoßung zwischen den Spitzen und der abströmenden Luft wie
das Segner'sche Wasserrad gedreht: das el. Flugrad (Fig. 287). — Bringt man an dem
abgewandten Ende eines influenzirten Kör-
pers eine Spitze an, so strömt die Influenzel.
zweiter Art aus derselben fort, und die In-
fluenzel. erster Art bleibt zurück; befindet sich
aber die Spitze an dem zugewandten Ende,
so fließt die Influenzel. erster Art aus der-
selben, die so elektrisirten Lufttheilchen nähern
sich dem influenzirenden Körper, neutralisiren
sich und einen Theil von dessen El., während
die gleichnamige Influenzel. zweiter Art auf
dem influenzirten Körper zurückbleibt. Wäh-
rend demnach auf dem influenzirenden Körper

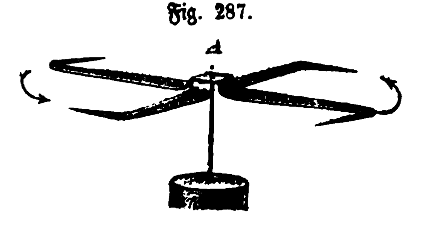


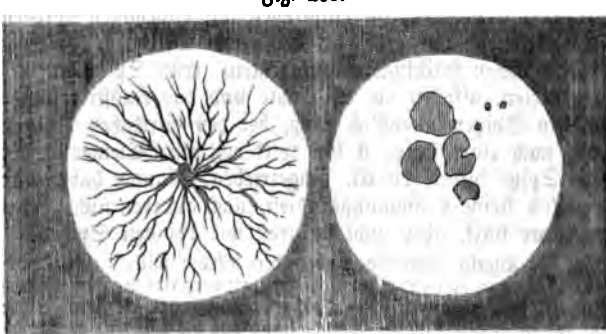
Fig. 287.

ein Theil seiner El. verschwindet, ist auf dem influenzirten Körper ein ebenso großer Betrag
gleichnamiger El. erschienen, die Spitze scheint diese El. eingesaugt und auf den letzteren
übergeführt zu haben. Hierin besteht die saugende Wirkung der Spitzen, welche
z. B. an der Elektrisirmaschine ein wesentliches Moment bildet. Stellt man einen Apparat,

der ein isolirtes Metallstängelchen enthält, das sich oben zu einer seitlichen Spitze krümmt und unten eine Kugel trägt, mit der Spitze nach dem Cond. zu, so springen Funken aus der Kugel auf eine gegenüberstehende Kugel oder auf ein darunter angebrachtes Schälchen voll Alkohol und entzünden denselben. Bei der saugenden Wirkung kommt jedenfalls auch in Betracht, daß der Spitze gegenüber in dem influenzirenden Körper wegen der starken Anziehung der Spitze die Dichte der El. ebenfalls sehr groß, und so das Ausströmen der El. verstärkt wird. Ganz ähnliche Wirkungen wie die Spitzen haben auch glimmende und flammende Körper, weil dieselben ebenfalls und zwar spitzigere Spitzen bilden, als die Körperspitzen sind; um einen nicht leitenden Körper vollkommen unel. zu machen, genügt es, ihn über eine Alkoholflamme hin- und herzuziehen. — Wie die El. aus ebenen Flächen nur schwer hinausgeht, so geht sie auch nur schwierig hinein; berührt daher ein angezogenes Papierschnitzelchen einen Glasstab, so nimmt es dessen El. nur selten an, wird daher auch nur selten abgestoßen, woraus sich das häufige Mißlingen des allerersten Versuches erklärt.

479 6. Unterschiede der beiden El., soweit sie mittels der Elektrisirmaschine erkennbar sind, bestehen nur wenige. Hält man dem neg. Cond. eine Spitze gegenüber, so zeigt sich an dieser ein Büschel, dem pos. gegenüber ein Stern; auch beim Ausströmen aus einer stark geladenen Maschine entsteht am pos. Cond. ein Büschel, am neg. ein Stern. Dem entsprechen die Lichtenberg'schen Figuren (1778) Fig. 288). Läßt man einen pos. Funken auf einen Kuchen von Schellack und Pech überschlagen und bestreut dann denselben mit Bärlappsamen, so bleiben nach Fortblasen des Staubes baumartig sich verästelnde Staubfiguren; mit dem neg. Funken entstehen nur rundliche Flecke. Entsprechend halten manche den pos. Funken für mehr schlagend, den neg. für mehr stechend. Nach Bezold (1872) entstehen die Fig. am deutlichsten auf Hartgummiplatten, wenn diesen die El. durch eine Drahtspitze zugeleitet wird. Im Dunkeln sieht man vom Draht, wenn er neg. ist, einen blauen Lichtkegel, dessen Achse der Draht ist, bis an die Platte gehen; wenn aber der Draht pos. ist, so entstehen verästelte Lichtfiguren auf der Platte. Da demnach die Lichtfig. mit den Staubfig. stimmen, so hält Bezold die letzteren für die Wirkung der von der El. in Bewegung gesetzten Lufttheilchen; die neg. Figur entstehe durch einen Kegel von Luftströmen, dessen Achse der Draht und dessen Basis die Fig. ist, die pos. dagegen durch Lufttheilchen, die auf der Scheibe von außen radial nach dem Punkte hinströmen, nach welchem der Draht gerichtet ist. Die Kundt'schen Figuren (1869) werden auf einer wagrechten, leitenden Platte erzeugt, z. B. auf einer rauhen Zinkplatte: dieser steht eine isolirte Spitze oder Kugel gegenüber. Werden diese und die Platte entgegengesetzt elektrisirt, während die Platte mit feinem Staub z. B. von Bärlapp bestreut ist, und wird dann der Staub abgeblasen, so bleiben scharf begrenzte Staubkreise bis zu 10cm Dm. zurück. Schneebeli (1870) und Röntgen (1874) haben die Größenverhältnisse untersucht: die Dm. sind um so größer, je größer die Platte und je dicker die Staubschicht ist; sie wachsen auch mit der Entfernung der Spitze bis zu einem gewissen Maximum, nach dessen Ueberschreitung sie abnehmen. Sie sind größer, wenn die Spitze neg., als wenn sie pos. ist, und bleiben ganz aus, wenn eine Kugel benutzt wird und diese neg. ist; in dünneren Gasen sind sie größer als in dichteren. Röntgen erklärt die Entstehung durch die fortführende Entladung des Conus einer Spitze: von demselben strömten die el. Lufttheilchen senkrecht zur Oberfläche, also innerhalb eines Kegelstumpfes, nach der Platte, gäben dort ihre El. an den Staub ab, so daß derselbe von der entg. El. der Platte in die Ecken der Rauhigkeiten hineingezogen und so festgehalten würde, und zwar innerhalb der kreisförmigen Grundfläche des Kegelstumpfes. Diese fortführende Entladung sei nur möglich, wenn die Abstoßung der Theilchen stark genug sei, die Lufthaut der Spitze zu durchbrechen, und sei daher an einer luftfreien Oberfläche besonders stark; hierdurch erkläre sich das Experiment von Guthrie (1873): ein erhitzter Leiter mit einem el. Körper in Berührung, ja nur in die Nähe gebracht, entladet diesen augenblicklich.

Fig. 288.



480 **Das elektrische Potential** (Green 1828, Gauß 1840). Der Begriff des Potentials, jedoch nicht der Name, wurde in die mathematische Behandlung der Schwerkraft schon 1777 durch Lagrange eingeführt; er machte die Bemerkung, daß sich die Anziehungscomponenten nach den drei Raumdimensionen von einer Funktion ableiten lassen, welche bei der Geltung des Gravitationsgesetzes die Summe der Quotienten aller Massentheilchen durch ihre Entf. sei, also $= \Sigma (m/a)$. Die Ableitung geschieht nach bestimmten Regeln der Differentialrechnung, und die abgeleiteten Funktionen heißen Derivirte oder Differentialquotienten. Laplace gab (1789) der ursprünglichen Funktion $\Sigma (m/a)$ die allgemein angewandte Bezeichnung V und fand den Satz, daß die Summen der drei zweiten Derivirten $= 0$ sei. Poisson zeigte indeß (1813), daß dies nur für außerhalb der anziehenden Masse liegende Massenpunkte gelte, während für innerhalb derselben liegende Punkte die Summe $= -4\pi\rho$ sei, worin ρ die Dichte im angezogenen Massenpunkt bedeutet. Gauß gab (1840) den ersten stichhaltigen Beweis für den Laplace-Poisson'schen Satz und zeigte, daß die Derivirtensumme für Punkte der Oberfläche selbst weder 0 noch $-4\pi\rho$ sei; hierbei gebrauchte er den Namen Potential für die ursprüngliche Funktion. Schon (1813) hatte er in seinem berühmten Werke „Theoria attractionis" diese Größe für das dreiachsige Ellipsoid entwickelt. Das Potential der Kugel und der Hohlkugel waren schon früher gefunden und zwar für einen äußeren Punkt $= m/a$, wo a den Abstand des äußeren Punktes bedeutet; hierin liegt der einfachste Beweis des Satzes, daß der Erdmittelpunkt der Sitz der Schwere ist, da die hier concentrirte Masse m ebenfalls das Potential m/a hat. Für einen in der Kugel liegenden Punkt ist $V = m/r$, wenn r den Kugelradius bedeutet; da dasselbe hiernach für alle Punkte constant ist, und da eine constante Größe die Derivirten 0 hat, so ergibt sich einfach der Satz, daß eine Hohlkugel auf einen Punkt im Innern der Höhlung keine anziehende Wirkung ausübt, was schon Newton geometrisch bewies und zur Erklärung der Abnahme der Schwerkraft nach dem Erdinnern zu benutzte (78. 5). Auch für das hohle Ellipsoid beweist die Potentialtheorie den Newton'schen Satz, und die Nothwendigkeit desselben für diesen Fall hatte eigentlich den Anstoß zur Entwicklung der Theorie gegeben. Da das Potential der Kugel für einen außerhalb gelegenen Punkt $= m/a$ ist, so hat jede zur Erdkugel concentrische Kugelfläche an allen Punkten dasselbe Potential; solche Flächen gleichen Potentials nennt man *äquipotentiale Flächen*; für kleinere Räume auf der Erde sind dieselben horizontal und heißen deshalb auch *Niveauflächen*. Die vertikale Richtung der Schwere steht auf den horizontalen Niveauflächen senkrecht; so nennt man allgemein die auf den äquipotentialen Flächen senkrechten Linien *Kraftlinien*; die Kraftlinien eines kugelförmigen Weltkörpers sind gerade nach dem Centrum laufende Linien, Radien. Je zwei Niveauflächen sind überall gleichweit von einander entfernt; sie haben also nach der Formel m/a überall gleiche Differenz der Potentiale, gleiche Potentialdifferenz. Bei dem Fallen eines Körpers auf beliebigem Wege durch dieselbe Höhe h zwischen zwei Niveauflächen erhält derselbe immer dieselbe Geschw. v, also auch dieselbe leb. Kraft $\frac{1}{2}mv^2$, bedarf also dazu derselben Arbeit der Schwerkraft. So liegt der Gedanke nicht fern, daß das Potential mit der Arbeit zusammenhänge, da gleichen Potentialdifferenzen gleiche Arbeiten entsprechen. In einer Gauß'schen Fl. von 1839 ist der Gedanke schon unausgesprochen enthalten, und Helmholtz sagte in seiner berühmten Schrift „Ueber die Erhaltung der Kraft" (1847): Die Zunahme an lebendiger Kraft ist gleich dem Ueberschuß des Potentials. Daß aber das Potential eine Arbeit sei, wurde erst später ausgesprochen.*) Eine Ahnung davon erhält der Anfänger, wenn er die auf die Masseneinheit ausgeübte Gravitation m/a^2 mit dem Wege a multiplizirt, da sich hierdurch das Potential m/a ergibt. Es läßt sich indeß leicht mit höherer Rechnung beweisen, daß das Potential gleich der Arbeit ist, welche die Kraft m/a^2 leistet, wenn sie die Masse 1 aus unendlicher Entfernung in die Entfernung a durch Anziehung bringt, oder sie durch Abstoßung aus der Entfernung a in unendliche Entfernung bewegt. Hieraus folgt denn, daß die Potentialdifferenz zweier Niveauflächen gleich der auf ihrem Abstande producirten oder consumirten Arbeit ist. Jedoch läßt sich dieser Satz auch elementar beweisen. Es sei der Abstand zweier Niveauflächen in beliebige kleine Strecken getheilt durch Theilpunkte, die von der wirkenden Masse um a_1 $a_2 \ldots\ldots a_n$ entfernt sein mögen; dann ist die Anz. in den einzelnen Theilpunkten $= m/a_1^2$, m/a_2^2, $m/a_3^2 \ldots\ldots m/a_n^2$. Die mittlere Anz. zwischen a_1 und a_2 ist $\frac{1}{2}(m/a_1^2 + m/a_2^2) = \frac{1}{2}(ma_2^2 + ma_1^2)/a_1^2a_2^2 = \frac{1}{2}m\,(a_1^2 + a_2^2)/a_1^2a_2^2$. Da a_1 und a_2 bei hinreichend zahlreicher Theilung der Strecke nur wenig verschieden sind, so ist die mittlere Anz. auch $= \frac{1}{2}m \,.\, 2a_1^2/a_1^2a_2^2 = m/a_1^2 = m/a_1a_2$. Ebenso ist die mittlere

*) Nur Redtenbacher hat diese mechanische Bedeutung des Potentials schon damals erkannt. Als ich (1853) in die Osterferien heimkehrte und dem verehrten Meister von Dirichlets Potentialvorträgen erzählte, sagte er wörtlich: „Kennen Sie denn auch die Bedeutung des Potentials; es ist nichts anderes, als die Arbeit der Kraft auf dem Wege vom Unendlichen bis in die Entf. r; integriren Sie das Differential der Arbeit $(m/r^2)dr$ zwischen Unendlich und r, so erhalten Sie m/r." In Dirichlets Vorträgen war der mir sehr vertraute Begriff Arbeit nicht vorgekommen.

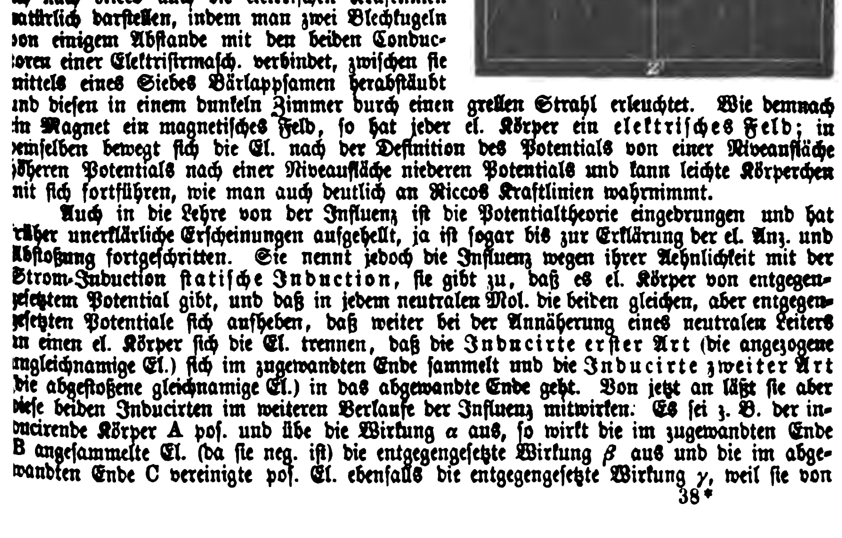
Anz. auf der folgenden Strecke $= m/a_2 a_3$ u. s. w. Jede dieser mittleren Anz. arbeitet auf den Strecken $a_2 - a_1$, $a_3 - a_2$ u. s. w.; also ist die Arbeit der ersten $= (a_2 - a_1)\, m/a_1 a_2 = m/a_1 - m/a_2$. Ebenso ist die Arbeit der zweiten $= m/a_2 - m/a_3$, die der dritten $= m/a_3 - m/a_4$ u. s. w. Demnach ist die ganze Arbeit zwischen den 2 Niveauflächen, deren Abstände von der wirksamen Masse $= a_1$ und a_n sind, $= m/a_1 - m/a_2 + m/a_2 - m/a_3 + m/a_3 - m/a_4 + \ldots + m/a_{n-1} - m/a_n = m/a_1 - m/a_n$, d. h. die Arbeit ist gleich der Potentialdifferenz. Liegt nun der letzte Theilpunkt im Unendlichen, so ist $m/a_n = 0$, also ist die Arbeit bis ins Unendliche $= m/a_1$, gleich dem Potential. Das Potential ist für die Leser dieses Buches durchaus nicht ein neuer Begriff, sondern durch den Begriff der Spannkraft oder potentiellen Energie (33.) schon bekannt, es ist nur ein Arbeitsbetrag zwischen gegebenen Grenzen. Daß die von einem Körper durch sein Potential geleistete Arbeit stets gleich dem Potential ist, darf nur dann angenommen werden, wenn das Potential während der Arbeitsleistung constant bleibt. Das Potential ist jedoch unzweifelhaft eine Leistungsfähigkeit, ein Trieb, Arbeit zu leisten, Bewegung hervorzubringen, Elektricität, Magnetismus und Körper in Bewegung zu versetzen; deshalb wird sehr häufig statt des Ausdruckes Leistungsfähigkeit der Ausdruck Potential gebraucht und das Potential jetzt durchgängig als Arbeit definirt; die alte Definition wird dadurch zum ersten Lehrsatze. Wir können demnach von dem Potential folgende allgemeine Definitionen und Lehrsätze aussprechen.

Das Potential einer Masse gegen einen Massenpunkt 1 ist die Arbeit, welche zur Bewegung des Punktes auf der Strecke zwischen der Entfernung und dem Unendlichen nothwendig ist; die Potentialdifferenz zwischen zwei gegebenen Stellen ist die Arbeit für die Bewegung des Massenpunktes von einer Stelle zur andern. Die Derivirten des Potentials nach den drei Raumdimensionen geben die Kraftcomponenten in diesen Richtungen; die Summe der drei zweiten Derivirten ist für einen äußeren Punkt $= 0$, für einen inneren $= -4\pi\rho$.

Wie jetzt noch in der elementaren Behandlung, so hatte vor 50 Jahren auch die höhere Theorie der El. und des Ms. nur das mährchenhafte Fluidum als verbindende Grundlage; in dem Bestreben, beiden Wissenschaften eine höhere Einheit in der mathematischen Behandlung zu gewinnen, versuchte Green (1828), ob der Begriff des Potentials, dem er hier zuerst den Namen Potentialfunktion beilegte, auch für eine unendlich dünne Oberflächenschicht passe und dieselben Lehrsätze ergebe. Ihm folgte Gauß (1840) mit allgemeineren Betrachtungen u. A. So entstand der Begriff des Flächenpotentials und seine Eigenschaften; auch für dieses ergab sich später, daß das überall stetige Potential $\Sigma(\varepsilon/a)$, worin ε die Quantität der El. bedeutet, gleich der Arbeit auf der Strecke zwischen a und Unendlich bedeutet, wobei man jedoch auch statt Unendlich die Erde setzen kann, da sie gegen alle el. Körper auf der Erde sich als unelektrisch verhält und demnach das Potential Null hat, wie die Masse m in unserem Beweise für $a_n = \infty$. Green, Gauß u. A. hatten schon gefunden, daß die erste Derivirte nach irgend einer Richtung gleich der Kraftcomponente in dieser Richtung ist, daß jedoch die Summe der drei zweiten Derivirten für alle Punkte außerhalb der Fläche $= 0$ sei, also auch für Punkte im Hohlraume eines Körpers; endlich hatte sich schon aus der Green'schen Grundformel der Green'sche Satz ergeben, daß an irgend einer Stelle der Fläche die Summe der nach beiden Seiten wirksamen Normalkräfte $= -4\pi\rho$ ist, worin ρ die im Fußpunkte der Normale herrschende Flächendichte bedeutet. Auch ist das Flächenpotential einer Kugel auf einen äußeren Punkt wie das Körperpotential $= \varepsilon/a$, während es für einen Punkt innerhalb und auf der Kugelfläche $= \varepsilon/r$ ist, wenn r den Radius bedeutet. Die große Uebereinstimmung des Flächenpotentials der El. mit dem Körperpotential der Schwere und der Green'sche Satz außerdem erweckten die Vermuthung, daß die Potentialtheorie in der Electricitätslehre noch fruchtbarer sein dürfte als in der Gravitation, worin man nicht getäuscht wurde; den Elektrotechnikern ist das Potential jetzt ebenso geläufig, wie den mechanischen Technikern der Begriff Pferdekraft. Mit Coulombs Drehwage, mit den Elektrometern von Kohlrausch, Thomson u. A. läßt sich das Potential einer geladenen Kugel messen und daraus nach der Fl. $V = \varepsilon/a$ oder $\varepsilon = aV$ die Elektricitätsmenge, Quantität oder Ladung finden. Besondere Bedeutung gewann die el. Potentialtheorie zu mathematischen Beweisen früher nur wenig befriedigend erklärter Sätze. Die experimentell bewiesene Wahrheit: der Sitz der El. ist die Oberfläche eines Körpers, läßt sich allgemein verständlich ableiten, aber nur mit der Voraussetzung des Fluidums; bewiesen wird sie mit dem Laplace-Poisson'schen Satze, daß die Summe der zweiten Derivirten für das Innere einer Kugel nur dann $= 0$ ist, wenn die Kraft ihren Sitz auf der Oberfläche hat. Da nun das Potential der Kugel für das Innere constant $= \varepsilon/r$ ist, so sind die Derivirten, also auch ihre Summe $= 0$; also ist die Oberfläche der Sitz der El.; im Falle des Gleichgewichtes ist das Potential an allen Stellen der Oberfläche gleich groß, weil sonst wegen des Arbeitsbestrebens des Pot. ein Strömen der El. eintreten müßte. — Die Sätze über die Verthei-

ung der El. auf der Oberfläche sind mittels des Green'schen Satzes streng zu beweisen; elementar äßt sich für die Kugel ein Versuch geben. Das Potential einer Kugelfläche $= \varepsilon / r$; das Potential einer Kugelfläche, deren Radius um die unendlich kleine Strecke dr größer ist als r, st $= \varepsilon/(r + dr)$. Die erste Derivirte, d. i. die Kraft in der Richtung des Radius wird nun rhalten, indem man die Differenz der Potentiale der zwei Kugelflächen durch ihren Abstand dividirt; also ist die Normalkraft $4\pi\varrho = (\varepsilon/r - \varepsilon/(r + dr))/dr$. Da hier rechts alle Größen constant sind, so muß auch ϱ constant sein. Die Kugelfläche hat überall gleiche el. Dichte. Für das Ellipsoid ergibt sich: Die Dichten verhalten sich an verschiedenen Stellen eines Ellipsoids wie die Entf. dieser vom Mittelpunkte; ein sehr dünner aber weit ausgedehnter Körper hat also am Rande die größte, in der Mitte die kleinste Dichte; ebenso natürlich eine egrenzte Fläche. — Haben zwei Kugeln von verschiedenem Radius gleiche Ladung, so ist das Potential der kleineren Kugel das größere, also ist auch das Arbeitsvermögen derselben überwiegend, das Bestreben der El., sich selbst fortzutreiben, aus dem Körper auszuströmen; das Ausströmungsvermögen ist bei scharfer Krümmung größer als bei schwacher; und ist der Radius der einen Kugel $= 0$, so ist das Ausströmungsvermögen unendlich groß; dies erinnert an ie Wirkung der Spitzen. Schärfer geht sie aus folgender Betrachtung hervor. Wenn iner von zwei miteinander verbundenen Kugeln Elektricität mitgetheilt wird, so breitet sich diese o aus, daß überall dasselbe Potential herrscht, daß also $\varepsilon/r = \varepsilon_1/r_1$, woraus $\varepsilon : \varepsilon_1 = r : r_1$. Sind nun die Dichten $= \varrho$ und ϱ_1, so ist $\varepsilon = 4r^2\pi\varrho$ und $\varepsilon_1 = 4r_1^2\pi\varrho_1$, woraus $\varrho : \varrho_1 = r_1^2\varepsilon : r^2\varepsilon_1$. Setzt man statt $\varepsilon : \varepsilon_1$ seinen Werth $r : r_1$, so erhält man $\varrho : \varrho_1 = r_1 : r$; die Dichten der zwei Kugeln verhalten sich umgekehrt wie ihre Radien. Wird die eine Kugel n einem Punkte, also eine Spitze, so ist ihre Dichte unendlich groß. — Von besonderem Interesse sind für die El. und den Magnetismus die äquipotentiellen Flächen mit den Kraftlinien. Die Oberfläche jedes el. Körpers schon ist eine Niveaufläche, weil das Potential überall dasselbe ist; da für äußere Punkte einer Kugel das Potential $= \varepsilon/a$ ist, so sind auch ier die Niveauflächen concentrische Kugeln und die Kraftlinien Radien. Denn ständen die Kraftlinien nicht auf einer Niveaufläche senkrecht, o ließe sich die Kraft an irgend einem Punkte n eine senkrechte und eine parallele Comp. zeregen, und die letzte müßte ein Fortströmen der El. veranlassen, was nach der Definition der Niveaufläche unmöglich ist; die Kraftlinien stehen also auf den Niveauflächen senkrecht. Maxwell hat beide Gebilde für den Fall geometrisch construirt, daß in A und B (Fig. 289) zwei gleiche, aber entgegengesetzte Ladungen vorhanden sind; die ausgezogenen Linien geben die Schnitte der Niveauflächen mit irgend einer durch A und B gehenden Ebene und die punktirten geben die Kraftlinien, deren Aehnlichkeit mit den magnetischen (Fig. 278) in die Augen springt. Indessen lassen sich nach Ricco auch die elektrischen Kraftlinien natürlich darstellen, indem man zwei Blechkugeln von einigem Abstande mit den beiden Conductoren einer Elektrisirmasch. verbindet, zwischen sie mittels eines Siebes Bärlappsamen herabstäubt und diesen in einem dunkeln Zimmer durch einen grellen Strahl erleuchtet. Wie demnach ein Magnet ein magnetisches Feld, so hat jeder el. Körper ein elektrisches Feld; in demselben bewegt sich die El. nach der Definition des Potentials von einer Niveaufläche höheren Potentials nach einer Niveaufläche niederen Potentials und kann leichte Körperchen mit sich fortführen, wie man auch deutlich an Riccos Kraftlinien wahrnimmt.

Fig. 289.



Auch in die Lehre von der Influenz ist die Potentialtheorie eingedrungen und hat früher unerklärliche Erscheinungen aufgehellt, ja ist sogar bis zur Erklärung der el. Anz. und Abstoßung fortgeschritten. Sie nennt jedoch die Influenz wegen ihrer Aehnlichkeit mit der Strom-Induction statische Induction, sie gibt zu, daß es el. Körper von entgegengesetztem Potential gibt, und daß in jedem neutralen Mol. die beiden gleichen, aber entgegengesetzten Potentiale sich aufheben, daß weiter bei der Annäherung eines neutralen Leiters an einen el. Körper sich die El. trennen, daß die Inducirte erster Art (die angezogene ungleichnamige El.) sich im zugewandten Ende sammelt und die Inducirte zweiter Art (die abgestoßene gleichnamige El.) in das abgewandte Ende geht. Von jetzt an läßt sie aber diese beiden Inducirten im weiteren Verlaufe der Influenz mitwirken. Es sei z. B. der inducirende Körper A pos. und übe die Wirkung α aus, so wirkt die im zugewandten Ende B angesammelte El. (da sie neg. ist) die entgegengesetzte Wirkung β aus und die im abgewandten Ende C vereinigte pos. El. ebenfalls die entgegengesetzte Wirkung γ, weil sie von

entgegengesetzter Seite her wirkt. Anfänglich ist α im Uebergewichte; da jedoch β und γ fortwährend wachsen, so ist bald $\alpha = \beta + \gamma$, die Induction ist zu Ende und die 3 El. sind im Gleichgewichte, weil eben $\alpha = \beta + \gamma$. Hierin liegen mehrere Folgerungen: Wenn α wächst, so wachsen auch β und γ, d. h. die Inducirten sind um so stärker, je stärker der Inducirende ist, d. h. je größer ihre Ladung und je kleiner ihre Entf. ist. Wird der inducirte Körper verlängert, so ist C weiter entfernt; daher muß γ, also auch β verstärkt werden, um α aufheben zu können, d. h. die Induction ist um so stärker, je länger der inducirte Körper ist. Wird C in die Erde verlegt, also sein Potential und somit seine Wirkung $= 0$, so hat β seinen größten Werth $= \alpha$, d. h. ein mit der Erde verbundener Körper erfährt die stärkste Induction und ist mit dem inducirenden Körper im Gleichgewichte. Darauf beruht Faradays Schutzwand oder Schirm. Um z. B. die elektroskopischen Blättchen gegen eine mögliche el. Einwirkung des Glasgehäuses zu schützen, wird eine Stanniolwand, ein Drahtgehäuse, ja nur eine Metallplatte in der Nähe des zu schützenden Gegenstandes angebracht, welche mit der Erde in Verbindung steht; die Schutzwand setzt sich mit einer zufälligen äußeren el. Einwirkung in das Inductionsgleichgewicht und hebt dieselbe auf. Wegen des Inductionsgleichgewichtes $\alpha = \beta + \gamma$ ist das Potential der Körperverbindung $= 0$, eine Wirkung der Induction ist unmöglich, da auch die Derivirten, die Kraftcomponenten und die Summe der Normalkräfte $4\pi\varrho$ also auch $4\pi\varepsilon$ gleich Null sind: demnach können verschiedene Inductionen in derselben Körperverbindung stattfinden, ohne sich gegenseitig zu stören (Uebereinanderlagerung der Gleichgewichte); ein inducirter Körper kann eine neue Ladung erhalten, und in einem geladenen Körper können sich noch mehrere Inductionen übereinander lagern. Hierher gehört Faradays Versuch mit einem elektrischen Körper in einem geschlossenen isolirten Metallgefäß, das auf dem Knopfe eines geschützten Elektroskops mit Gradbogen in Verbindung steht. Beim Einsenken gehen die Blättchen mehr und mehr auseinander, behalten aber von einer gewissen Tiefe des Einsenkens an ihre Lage genau bei, wohin man den el. Körper auch bringen möge, ja selbst bei der Berührung der Innenwand; das Inductionsgleichgewicht ist hergestellt, und bei der Berührung vereinigt sich die Inducirte erster Art mit der Inducirenden; sie waren also völlig gleich, und es bleibt nur die ebenso starke Inducirte zweiter Art; die Divergenz der Blättchen ist auch dieselbe, wenn eine Anzahl von geschlossenen, von einander isolirten Gefäßen zwischen dem el. Körper und dem Elektroskop vorhanden ist. — Bei der Wirkung zweier el. Körper aufeinander (A mit dem Potential V und B mit Potential V_1) kommt die Uebereinanderlagerung der Gleichgewichte zur Anwendung, wie Mascart folgendermaßen erklärt: Steht B mit der Erde in Verbindung, ist also B auf dem Potential Null, so entwickelt die z. B. pos. Ladung α von A eine neg. Ladung $-\alpha'$ in B; da α prop. ist zu V, so ist auch $-\alpha'$ zu V prop., die Wirkung ist also prop. zu V^2, kann demnach $= -cV^2$ gesetzt werden, da sie aus pos. und neg. zusammengesetzt ist (c ist eine Constante). Steht A mit der Erde in Verbindung, ist also auf dem Potential Null, so entwickelt die Ladung $+\beta$ von B eine Inducirte $-\beta'$ in A, wodurch wie eben die Wirkung $-c'V_1^2$ entsteht. Sind beiderlei Inductionen in den Körpern gelagert, so sind A und B auf den Potentialen V und V_1, wie es der Voraussetzung entspricht. Es ist dann nur noch zuzufügen, daß die Ladungen $+\alpha$ und $+\beta$ in A und B eine Wirkung erzielen, die prop. zu V und V_1 ist, ebenso wie die Wirkung von $-\alpha'$ und $-\beta'$, so daß noch eine Wirkung $+c''VV_1$ stattfindet; die Gesammtwirkung ist ist hiernach $= -cV^2 - c'V_1^2 + c''VV_1$. Sind die Potentiale V und V_1 entgegengesetzt, so ist der ganze Ausdruck negativ, die Bewegung ist dann entgegengesetzt zu der natürlichen Bewegung der El., die von einem el. Körper weggerichtet ist, weil sie von den Niveauflächen höheren Potentials nach denen niederen Potentials stattfindet und die letzteren nach der Fl. ε a weiter von dem el. Körper entfernt sind; die Bewegung ist eine annähernde, wir sagen: es findet Anziehung statt. Das kann indeß auch geschehen, wenn die Potentiale gleiche Zeichen haben (473. 3); es muß dann nur $cV^2 + c'V_1^2$ größer sein als $c''VV_1$; ist dagegen $c''VV_1$ größer als $cV^2 + c'V_1^2$, so findet Abstoßung statt.

In der alten Elektricitätslehre war schon ein Begriff gebräuchlich, den man mit Potential verwechseln darf, die elektromotorische Kraft, wie das Wort besagt, die Kraft, welche El. in Bewegung versetzt; man gebraucht indessen dies Wort auch für die unbekannte Ursache der Bewegung, also abstrakt; beim concreten Gebrauche verstand man darunter die Kraft, welche die El. bis zu einem bestimmten Punkte bewegt; versteht man demnach unter elektromotorischer Kraft nicht eine Art Druck oder Zug, überhaupt nicht eine Kraft, die mit mv : t oder ma gemessen wird, sondern wie in den Ausdrücken Pferdekraft, lebendige Kraft, Spannkraft eine Energie, eine arbeitleistende Kraft, so ist elektromotorische Kraft mit Potentialdifferenz identisch. Beide sind denn auch von derselben Dimension; das Potential ist ε / l und die Quantität ist nach (469.) $\varepsilon = m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$; durch Division mit l ergibt sich $(\mathrm{dim}\ V) = m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$. — Nicht verwechseln darf man Potential mit Dichte oder Dichtigkeit ϱ; denn diese ist ja nur die Quantität auf der Flächeneinheit, während das Poten-

tial = der ganzen Quantität dividirt durch die Entf. oder den Radius ist; für einen Punkt einer Kugeloberfläche ist z. B. $V = 4r^2\pi\varrho/r = 4r\pi\varrho$, also $= 4r\pi$ mal der Dichte. Die erste Derivirte in der Richtung des Radius ist hieraus $= 4\pi\varrho$, woraus für diesen speciellen Fall der Green'sche Satz folgt. Dichte und Potential sind demnach wesentlich verschieden; ist ja doch auf jedem statischen el. Körper das Potential überall dasselbe, während die Dichte, ausgenommen die Kugel, bekanntlich sehr verschieden ist. — Die Verwechselung von Potential mit Spannung liegt noch näher, weil es auch eine der Potentialdifferenz entsprechende Spannungsdifferenz gibt; indessen ist auch diese Verwechselung unstatthaft. Die Spannung ist der Druck, den die El. vermöge des Potentials nach außen hin ausübt; sie steht in derselben Beziehung zum Potential, wie die Elasticität einer aufgezogenen Uhrfeder zu der Arbeit, welche dieselbe leisten kann, zu der potentiellen Energie. Sie wird gemessen durch den Druck, den die El. auf die Flächeneinheit ausübt. Nach dem Green'schen Lehrsatze ist die Summe der Normalkräfte $= 4\pi\varrho$; dies bezieht sich jedoch, wie das Potential selbst auch, auf die Einheit der Quantität; da jedoch die Quantität in der Flächeneinheit $= \varrho$ ist, so ist der Druck auf die Flächeneinheit $4\pi\varrho \,.\, \varrho$, also die Spannung $= 4\pi\varrho^2$. Hier tritt auch schon der beim el. Strome so wichtige Unterschied zwischen Quantität und Tension oder Spannung hervor; während erstere der ersten Potenz der Dichte proportional ist, wächst letztere proportional zum Quadrat der Dichte. — Schließlich ist noch eine Verwechselung auszuschließen, die wegen der Identität von Potential und Arbeit sehr nahe liegt; die Arbeit, welche ein el. Körper leisten kann, ist nämlich nicht gleich seinem Potential; denn bei der el. Arbeit eines Körpers kommt es zunächst darauf an, welchem Potential er sich gegenüber befindet, und dann bleibt das Potential, während es seine eigene El. fortbewegt, nicht constant, sondern nimmt fortwährend ab. Für die elektrische Arbeit gilt folgender Satz: die Arbeit eines Potentials gegenüber dem Potential Null ist gleich dem halben Product des Potentials mit der Quantität $= \frac{1}{2}V\varepsilon$. Man muß sich bei dem Beweise an die Definition des Potentials erinnern, daß es sich nämlich auf die Einheit der fortbewegten El. gegenüber dem Unendlichen oder dem Potential Null bezieht; wäre das Potential constant, so wäre demnach seine Arbeit $= V\varepsilon$. Da jedoch hierbei die Menge und demnach auch das Potential der El. immer kleiner wird, so müssen wir statt V das mittlere Potential zwischen V und 0 setzen, das wegen der regelmäßigen Abnahme $= \frac{1}{2}V$ ist. Die Elektricitätsmenge ε wird davon nicht berührt; denn sie fließt ja bei der Abnahme des Potentials von V bis 0 vollständig ab; demnach ist die Arbeit $= \frac{1}{2}V\varepsilon$. — In naher Beziehung zum Potential steht der Begriff Capacität, der dem verwandten und gleichnamigen Begriffe aus der Wärmelehre nachgebildet ist. Man versteht unter Capacität nämlich diejenige Quantität von El., welche im Stande ist, einen Körper auf das Potential 1 zu bringen. Bezeichnet man dieselbe mit C, so ist die Quantität ε, welche das Potential V hervorruft, $= CV$; also besteht die Gl. $\varepsilon = CV$. Für eine Kugel z. B., wo $V = \varepsilon/r$ ist, ergibt sich hieraus $\varepsilon = C\varepsilon/r$, woraus $C = r$. Die Capacität einer Kugel ist gleich ihrem Radius; d. h. will man mehreren Kugeln dasselbe Potential verleihen, so müssen die Ladungen den Radien proportional sein. Setzt man den Werth für $\varepsilon = CV$ in die elektrische Arbeit ein, so erhält man für dieselbe den Ausdruck $\frac{1}{2}CV^2$; ebenso ist die Arbeit zwischen den Potentialen V u. V_1 gleich $\frac{1}{2}C(V^2 - V_1^2)$, Ausdrücke, die an die analogen für die lebendige Kraft erinnern.

Der Elektrophor (Wilcke 1762, Volta 1775) besteht aus einem blasenfreien Harzkuchen (aus schwarzem Pech und Kolophonium zu gleichen Theilen gegossen), der in einer metallenen Schüssel, der Form ruht, und von einer mit einem isolirenden Handgriffe versehenen Metallplatte, dem Schilde, bedeckt ist. Der Kuchen wird durch Peitschen mit einem Fuchsschwanze neg. el. Der Elektrophor bietet folgende 4 Erscheinungen dar: 1. Setzt man den Schild auf den gepeitschten Kuchen und hebt ihn ohne Berührung wieder auf, so ist er unel. 2. Berührt man den Schild aber vor dem Aufheben, so ist er nachher pos. el. 3. Berührt man bei aufliegendem Schilde Form und Deckel, so empfindet man eine Zuckung, einen el. Schlag. 4. Der Harzkuchen behält seine El., wenn der Schild aufliegt, Monate lang, eine Eigenschaft, die man die Tenacität des Kuchens nennt; auf derselben beruht die multiplicirende Wirkung der Kuchen, die in der Holtz'schen Maschine zur Anwendung kommt. 481

Diese Erscheinungen sind eine sehr lehrreiche Folge der Influenz. Der neg. Kuchen zieht die pos. El. des Schildes in die Unterfläche desselben und hält sie dort fest, stößt aber die neg. El. des Schildes in dessen obere Fläche. Hebt man den Schild ohne vorherige Berührung mittels des isolirenden Handgriffes auf, so vereinigen sich diese beiden El. wieder,

der Schild ist wieder unel. Berührt man aber den Schild vor dem Aufheben, so geht die abgestoßene neg. El. in die Erde, die festgehaltene pos. aber bleibt zurück, einstweilen noch gebunden. Wird nun der Schild gehoben, so wird diese gebundene El. frei, der Schild ist pos. el., gibt Funken, kann zum Laden eines Conductors durch öftere Wiederholung des Vorganges benutzt werden u. s. w., wobei sich die El. des Kuchens durchaus nicht vermindert, während unaufhörlich im Schilde El. erzeugt, also die vorhandene El. vervielfacht werden kann. Um die Multiplication noch zu beschleunigen, haben Phillips und Maxwell in die Mitte der Scheibe einen Metallstift von der Oberfläche bis zur Schüssel angebracht, so daß die Berührung mit der Hand vor dem Aufheben wegfällt. Daß diese Erklärung der Haupterscheinung richtig ist, wird durch einen Apparat Wilckes bewiesen, der aus 2 dünnen durch Seidenschnüre verbundenen und getragenen Metallplatten besteht. Legt man diese Vorrichtung als Schild auf den Kuchen und hebt sie dann ohne Berührung, so zeigt sich von den 2 sofort getrennten Platten die obere neg., die untere pos., und beide zusammen, wenn man sie isolirt auf einander legt, unel.: berührt man aber vor dem Aufheben die obere Platte, so ist nach dem Aufheben nur die untere Platte el. und zwar pos. — Die Tenacität des Kuchens hat verschiedene Gründe: die ebene Oberfläche, aus welcher die El. nur schwer hinausgeht; die Abwesenheit von zerstreuend wirkender Luft durch Aufsetzen des Deckels; auch eine Influenzwirkung der neg. Oberfläche des Kuchens. Die neg. El. des Kuchens zieht aus dem unteren Theile des Kuchens pos. in ihre Nähe bis in die Mittelfläche desselben und stößt neg. El. in die Unterfläche und in die Form. Ist die Form isolirt, so zeigt sie sich neg. el.; ist sie aber nicht isolirt, so geht diese neg. El. in die Erde, und die ganze Unterhälfte des Kuchens wird pos. el., ja sogar die Form auch; diese pos. El. des unteren Kuchentheils hält die neg. des oberen fest und wird von ihr festgehalten. Berührt man aber zuerst die Form und dann den aufliegenden Schild mit Daumen und Finger, so strömt pos. El. von der Form zum Schilde, und neg. vom Schilde zur Form, beides durch die Hand, welche dabei eine Zuckung empfindet; diese entgegengesetzte Bewegung beider El. in einem Leiter wird el. Strom genannt und, wenn sie nur einen Moment dauert, el. Schlag.

482 **Die Ansammlungsapparate** (Rieß 1853). Mittels der Elektrisirmaschine und des Elektrophors kann man einem Leiter nur bis zu einer gewissen Grenze El. mittheilen; die Grenze ist erreicht, wenn die el. Dichte des Leiters gleich der-jenigen des mittheilenden Körpers ist. Die Ansammlungsapparate haben den Zweck, eine gößerer Menge von El. in einem Leiter, oder gewöhnlich beider El. in zwei von einander isolirten Leitern anzusammeln. Der eine Leiter ist dabei leitend mit der Erde verbunden, der andere ist isolirt und kann durch einen Fortsatz mit dem mittheilenden Körper in Berührung gebracht werden; der erstere heißt Condensator, der letztere Collector.

Fig. 290.

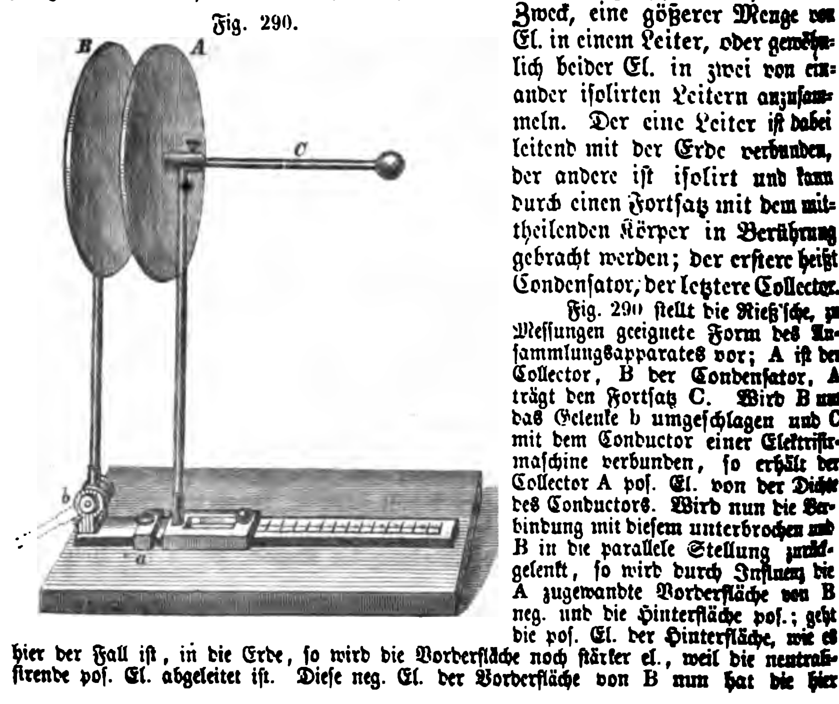


Fig. 290 stellt die Rieß'sche, zu Messungen geeignete Form des Ansammlungsapparates vor; A ist der Collector, B der Condensator, A trägt den Fortsatz C. Wird B um das Gelenke b umgeschlagen und C mit dem Conductor einer Elektrisirmaschine verbunden, so erhält der Collector A pos. El. von der Dichte des Conductors. Wird nun die Verbindung mit diesem unterbrochen und B in die parallele Stellung zurückgelenkt, so wird durch Influenz die A zugewandte Vorderfläche von B neg. und die Hinterfläche pos.; geht die pos. El. der Hinterfläche, wie es hier der Fall ist, in die Erde, so wird die Vorderfläche noch stärker el., weil die neutralisirende pos. El. abgeleitet ist. Diese neg. El. der Vorderfläche von B nun hat die hier

wesentlichste Wirkung; sie zieht die vorher gleichmäßig durch A und C verbreitete pos. El. des Collectors großentheils in dessen dem Condensator zugewandte Hinterfläche, wodurch die Dichte dieser El. auf der Vorderfläche und in dem Fortsatze stark vermindert wird. Folglich ist auch die Dichte der Fortsatzkugel kleiner als die des Conductors, und wenn dennach diese Kugel den Conductor wieder berührt, so kann abermals pos. El. auf den Collector strömen. Da diese in derselben Weise durch Influenz in dem Condensator neg. El anhäuft, so wird sie von dieser abermals großentheils nach der Hinterfläche des Collectors hingezogen, die el. Dichte der Vorderfläche und des Fortsatzes werden auch jetzt vermindert, und es kann deßhalb wieder vom Conductor pos. El. in den Fortsatz und Collector strömen; diese wirkt wieder durch Influenz auf den Condensator und gibt demselben neg. El. So häuft sich denn die pos. El. im Collector und die neg. im Condensator immer mehr an. Diese Anhäufung geht aber nicht bis ins Unendliche; denn bei jeder neuen Einströmung geht doch nicht alle pos. El. in die Hinterfläche des Collectors, ein Theil bleibt auch in diesem selbst und seinem Fortsatze zurück; folglich vermehrt sich die Dichte der Fortsatzkugel mit jeder Einströmung; ist dieselbe gleich der Dichte des Conductors geworden, so findet keine Einströmung mehr statt, der Ansammlungsapparat ist geladen. Wie groß die Dichtigkeit der pos. El. auf dem Collector ist, ergibt sich daraus, daß diese Dichtigkeit zu derjenigen der Fortsatzkugel, also auch des Conductors in demselben Verhältnisse steht, wie bei der ersten Einströmung die Dichte des Collectors zu der des Fortsatzendes. Die **Verstärkungszahl des Ansammlungsapparates**, d. i. der Quotient der Dichte des Collectors durch die des Conductors ist gleich dem Quotienten der Dichte der Fortsatzkugel vor und nach dem Zurücklenken des Condensators bei der ersten Einströmung. Sie wird also gefunden, indem man die Dichte der Fortsatzkugel vor und nach dem Zurücklenken mißt, und die erste durch die letzte dividirt. Rieß fand, daß die **Verstärkungszahl** abnimmt, wenn die Entfernung zunimmt, und daß sie **bei kleinen Entfernungen diesen umgekehrt proportional** ist; von Einfluß ist aber auch die Größe der Scheiben, und zwar ist die Verstärkungszahl **für größere Scheiben größer**; dann nimmt die Verstärkungszahl auch etwas zu, wenn die Länge der Zuleitung stark abnimmt; ebenso ist sie größer, wenn der Ableitungsdraht des Condensators zu dessen Fläche parallel, als wenn er senkrecht ist; auch ist sie größer, wenn die Zuleitung nach der Mitte des Collectors geschieht, als wenn sie nach dem Rande hin stattfindet; endlich hängt sie von dem **Material zwischen den Platten** ab, von dem **Dielectricum** (489.).

So fand Rieß, daß bei einer Entf. der Scheiben von $4{,}5^{mm}$ die Dichte am Ende der Zuleitung 0,155 von der anfänglichen Dichte betrug; also war die Verstärkungszahl $1/0{,}155 = 6{,}4$; bei einer Entf. von 9^{mm} war dieselbe $= 1/0{,}274 = 3{,}6$. Der Dm. der Scheibe betrug im ersten Falle 184^{mm}; betrug derselbe aber nur 117^{mm}, so war die Verstärkungszahl nur 4,3 gegen 6,4. Die Länge des Zuleitungsdrahtes war bei 6,4 gleich $7{,}8^{mm}$; hatte der Draht aber eine Länge von 225^{mm}, so ergab sich die Verstärkungszahl $= 5{,}8$. — In unserer Fig. ist der Isolator, welcher den Collector und den Condensator trennt, eine Luftschicht; durch einen starren Isolator wird die Wirkung nicht geschwächt, sondern gestärkt; denn die Zerstreuung durch die Luft fällt weg, die beiden El. rücken nach Franklin von den Metallplatten weg auf die äußersten Schichten des Isolators, wodurch sie sich einander näher kommen und dadurch die Verstärkungszahl vergrößern, und endlich kann man bei starrer Zwischenschicht stärker laden als bei luftartiger Zwischenschicht, weil die Luft der Vereinigung beider El. in einem Funken einen kleineren Leitungswiderstand entgegenstellt als ein starrer Nichtleiter. Die drei Hauptformen des Ansammlungsapparates sind der Condensator, die el. Flasche und die Franklin'sche Tafel. Unter Condensator wird jedoch nicht die Condensatorplatte des eben betrachteten Ansammlungsapparates, sondern eine andere Vorrichtung, deren Hauptelement allerdings die Condensatorplatte ist, verstanden.

Die **Potentialtheorie** beweist zunächst, daß die **Capacität** eines Leiters, des Collectors, größer wird, wenn man in seine Nähe einen anderen von jenem inducirten Körper, den Condensator bringt, und das Max. erreicht, wenn dieser mit der Erde verkehrt. Denn jedes neutrale Mol. des Condensators wird, wenn der Coll. pos. ist, in ein neg. At. $-\alpha$ und ein pos. At. $+\alpha$ zerlegt; demnach ist das neue Potential $V' = V + \Sigma(\alpha/a') - \Sigma(\alpha/a'')$. Ist nun der Coll. pos., so sind die $+\alpha$ weiter entfernt als die $-\alpha$, die a' sind größer als die a'', der pos. Summand ist kleiner als der neg.; also ist $V' < V$, das neue Potential ist kleiner als das ursprüngliche, und am kleinsten, wenn der pos. Summand $= 0$ ist, d. h. wenn der Condensator mit dem Potential 0 der Erde in Verbindung steht. Da jedoch die Quantität des Coll. durch die Induction nicht geändert wurde, da also $\varepsilon = CV$ dasselbe geblieben ist, so entspricht der Abnahme von V eine Zunahme von C, eine Zunahme der Capacität, worin das Wesen der Condensation besteht. Sodann beweist die Potentialtheorie allgemein, daß die **Ladung des Ansammlungsapparates der Oberfläche und dem Potential direct, sowie der Dicke der Zwischenschicht umgekehrt proportional** ist. Elementar und einfach läßt sich der Beweis für den kugelförmigen Apparat

führen. Der Coll. habe die Ladung ε, also das Potential ε/r, so inducirt er in der zugewandten Seite des Condens. die Ladung $-\varepsilon$ mit dem Pot. $-\varepsilon/r'$ und in der Außenseite die Ladung $+\varepsilon$ mit dem Pot. $+\varepsilon/r''$. Das neue Pot. ist also $V = \varepsilon/r - \varepsilon/r' + \varepsilon/r''$; da der Cond. mit der Erde verkehrt, so ist das letzte Pot. $= 0$, also $V = \varepsilon/r - \varepsilon/r' = \varepsilon(r' - r)/rr'$. Setzen wir nun $r' - r$, die Dicke des Dielectricums $= d$, so ist $V = d\varepsilon/r(r+d)$. Da nun $\varepsilon/V = C$, so ergibt die letzte Gl. $C = r(r+d)/d = r + r^2/d$. Die ursprüngliche Capacität r der Kugel hat also um r^2/d zugenommen oder ist $(r+d)/d = (1 + r/d)$ mal so groß geworden. Ist nun die innere Oberfläche der Kugel $= O = 4r^2\pi$, so ist $r^2 = O/4\pi$. Setzen wir diesen Werth in den letzten für die Capacität ein, so erhalten wir $C = r + O/4\pi d = (1 + 4\pi dr/O)\, O/4\pi d = (1 + d/r)\, O/4\pi d$. Die neue Ladung $\varepsilon = CV$ ist also $(1 + d/r)\, VO/4\pi d$. Da d/r jedenfalls ein sehr kleiner Bruch ist, so kann man annähernd setzen $\varepsilon = VO/4\pi d$, womit der obige Satz bewiesen ist.

483 1. Der Condensator (Volta 1783, Kohlrausch 1849) hat den Zweck, El. von sehr geringer Dichte zu verdichten, um sie noch nachweisen, erkennen und messen zu können. Er besteht aus der Condensatorplatte und der Collectorplatte, welche auf der einen Seite mit einer wohl isolirenden Firnißschicht überzogen sind und auf der anderen Seite gläserne Handgriffe tragen; die Condensatorplatte kann von ihrem Handgriffe ab- und auf die Zuleitungsstange eines Elektroskops aufgeschraubt werden.

Man bringt den zu prüfenden Körper an die Collectorplatte, während man die Condensatorplatte ableitend mit den Finger berührt; die Firnißschicht bildet den trennenden Isolator; die Collectorplatte ladet sich mit der gleichnamigen und die Condensatorplatte mit der ungleichnamigen El.; berührt man mit der Collectorplatte den Knopf eines Elektroskops, so erfährt man, ob der Körper El. enthielt. Ist die Condensatorplatte aufgeschraubt, so muß man die Collectorplatte auf dieselbe setzen, mit dem Körper berühren, während die Condensatorplatte ableitend berührt ist; dann hebt man die Collectorplatte ab, und sieht dann an den elektroskopischen Blättchen, ob der Körper el. war oder nicht; in dem letzten Falle erhält das Elektroskop die entgegengesetzte El. des zu untersuchenden Körpers. Soll dies nicht stattfinden, so muß man die obere Platte ableitend berühren und an die untere den zu prüfenden Körper bringen. Will man ein Urtheil über die Art der El. ermöglichen, so genügt es, den geriebenen Glasstab zu nähern; gehen die elektroskopischen Blättchen auseinander, so sind sie pos., gehen sie zusammen, neg. Kohlrausch hat einen Condensator, der Messungen schwacher El. ermöglicht, construirt. Die beiden Messingplatten, an ihren Vorderflächen vergoldet, sind mittels ihrer messingenen Fortsatzstängelchen in Holzträgern befestigt, von denen der eine fest, der andere verschiebbar auf der Bodenplatte des Apparates sitzt; die beiden Platten werden einander genähert, geladen und dann durch Ziehen an einem Faden weit von einander entfernt; da hier die Zuleitung, Ableitung u. s. w. immer dieselbe ist, so ist auch die Verstärkungszahl immer dieselbe; man hat also an der Einwirkung der Collectorplatte auf ein Elektroskop ein Urtheil über die Stärke der El.

484 2. Die elektrische Flasche (Kleist in Cammin 1745, Cuneus in Leyden 1746) dient zur Ansammlung einer größeren Menge von El., als ein Leiter für sich aufnehmen kann. Sie besteht aus einem Glascylinder, der innen und außen bis auf $2/3$ seiner Höhe mit Stanniol belegt und an dem übrigen Theile mit Siegellackfirniß bestrichen ist. Das Glas wird mit einem Deckel aus trockenem Holze versehen, durch welchen ein Messingstäbchen geht, das außen einen Knopf und innen Kettchen trägt, die auf dem inneren Belege schleifen. Um die Flasche zu laden, wird der äußere Beleg leitend mit der Erde verbunden, indem man die Flasche z. B. in die Hand nimmt oder auf eine leitende Unterlage stellt, und der Knopf des inneren Beleges wird mit dem Conductur einer Elektrisirmaschine leitend verbunden oder in Berührung gebracht, oder mit dem Schilde des Elektrophors öfter berührt. Der innere Beleg bildet den Collector, das Stäbchen mit dem Knopfe den Fortsatz und der äußere Beleg den Condensator. Die pos. El. des inneren Beleges stößt pos. des äußeren in die Erde, zieht neg. desselben an und hält sie fest und wird von dieser angezogen und festgehalten, so daß die el. Dichte in dem Stängelchen nach oben immer mehr abnimmt und daher in dem Knopfe gering ist; deßhalb wird so lange die Einströmung sich wiederholen, bis die Dichte des Knopfes gleich der des Conductors ist; dann wird aber die Dichte im inneren und äußeren Belege die des Conductors soviel mal übertreffen, als die durch die

Dimensionen erzielte Verstärkungszahl angibt. Fig. 291 stellt den elektrischen Zustand einer geladenen Flasche dar, die Stanniolдicke der Deutlichkeit wegen stark vergrößert. Die geladene Flasche hat folgende Vorzüge vor dem geladenen Conductor: 1. Sie enthält beide El. 2. Die beiden El. sind viel stärker als die des Conductors. 3. Die beiden El. sind so nahe beisammen, daß ihre Zusammenwirkung leicht stattfinden kann. 4. Die beiden El. halten einander fest, so daß die Flasche lange geladen bleibt. — Durch Vergrößerung der Flaschen und Belege kann man die Verstärkungszahl vergrößern; da aber hier eine gewisse Grenze geboten ist, so verbindet man mehrere Flaschen zu der *elektrischen Batterie*, indem man sie mit ihren äußeren Belegen auf eine gemeinschaftliche leitende Unterlage stellt und die Knöpfe der inneren Belege durch Stäbe mit einander oder mit einem gemeinschaftlichen Hauptknopfe verbindet. Sind in einer Batterie die äußeren Belege der 2 ersten, die inneren der 2. und 3., die äußeren Belege der 3. und 4. u. s. w. verbunden, so nennt man sie *Cascade*. Eine andere Form dieses Apparates ist die *Franklin'sche* (1751) *Tafel*, eine 4eckige in ein Fußgestell gefaßte Glasplatte, welche auf beiden Seiten theilweise mit Stanniol belegt und an den übrigen Theilen gefirnißt ist. Die Batterie und die Tafel werden wie die Flasche geladen. Eine *Entladung* findet statt, wenn man den äußeren Beleg mit dem Knopfe des inneren Beleges leitend, durch den sogen. *Schließungsbogen*, verbindet; es bewegt sich dann die pos. El. vom inneren Belege zum äußeren und die neg. vom äußeren zum inneren, wodurch ein gleicher Betrag beider neutralisirt wird. Diese entgegengesetzte Bewegung und Vereinigung der beiden El. in einem Leiter nennt man, wie schon erwähnt, einen *elektrischen Strom*, und wenn derselbe wie bei der el. Flasche eine sehr kurze Dauer hat, gewöhnlich einen *elektrischen Schlag*. Ist die El. stark genug, so geht der el. Schlag auch durch Nichtleiter, wie z. B. durch die Luft, wobei der *elektrische Funke* entsteht; der el. Funke ist demnach ein el. Schlag durch die Luft.

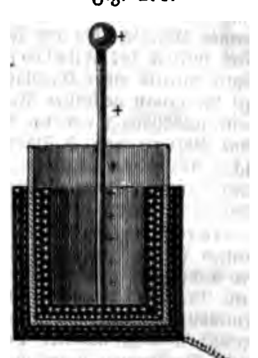


Fig. 291.

In den Schließungsbogen schaltet man Körper verschiedener Art ein und beobachtet dann die verschiedenen Wirkungen der Entladung, des elektrischen Schlages, auf dieselben; man bedient sich hierbei verschiedener Entlader. Henleys *allgemeiner Auslader* (1760) (Fig. 292) besteht aus 2 Metallstäben mit Knöpfen und Ringen, die an Gelenken auf Glasfüßen drehbar und verschiebbar sind und dadurch mit ihren Knöpfen einem Tischchen nahe gebracht werden können; in die Ringe werden Drähte eingehängt, die von den Belegen kommen, auf das Tischchen zwischen die Knöpfe werden die Gegenstände gebracht, durch welche der el. Schlag gehen soll. Andere Entlader bestehen aus dreh- oder biegbaren Metallstäben, die mit Knöpfen endigen und mit einem oder 2 Glasstäben, oder an einer Guttaperchahülle gefaßt werden, und deren Knöpfe mit dem inneren und äußeren Belege in Verbindung zu bringen sind.

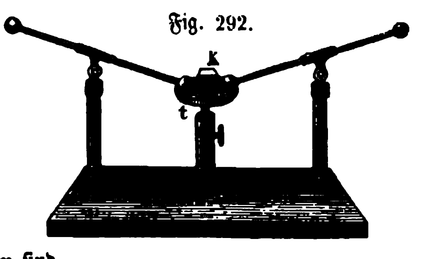


Fig. 292.

Die Ladung der Flasche mißt man mittels Lanes *Maßflasche* (1757). In gleicher Höhe mit dem Knopfe der letzteren ist ein verschiebbares und getheiltes Messingstäbchen angebracht, das in der Nähe des Knopfes ebenfalls einen Knopf und am anderen Ende einen Ring zur Aufnahme eines von dem äußeren Belege herkommenden Drahtes trägt. Der Knopf dieser Maßflasche wird nun mit der äußeren Belegung der zu messenden Flasche verbunden und diese geladen; dann strömt sämmtliche abgestoßene pos. El. dieses äußeren Beleges auf den Knopf der Maßflasche über, ladet diese und erzeugt bei ganz bestimmter

Ladung einen Funken zwischen diesem Knopfe und dem des Stäbchens: die Zahl dieser Funken bei einem bestimmten Abstande der 2 Knöpfe gibt ein Urtheil über die Stärke der Ladung der ersten Flasche; diese hat immer wieder dieselbe Ladung, wenn die Maschine bei demselben Abstande der Knöpfe dieselbe Funkenzahl gegeben hat.

485 **Wirkungen der Entladung.** 1. Der Flaschenfunke. Legt man den einen Knopfe eines Entladers an den äußeren Beleg einer Flasche und nähert den andern dem Knopf des inneren Beleges, so springt in der Schlagweite ein hell weißleuchtender, geradlinig fortschreitender, stark knallender Funke über, eine Entladung durch die Luft. Die meisten Eigenschaften des Funkens wurden schon früher betrachtet. Die Schlagweite maß Rieß mittels des Funkenmikrometers; dasselbe besteht aus einem fest auf einer Fußplatte mittels einer Glassäule ruhenden Knopfe mit Klemmschraube und einem ebensolchen auf der genau getheilten Fußplatte verschiebbaren Knopfe. Nach Rieß ist zwar die Schlagweite unabhängig von der Natur des Schließungsbogens, nicht aber die Stärke des Funkens. Eine Batterie von 5 Flaschen gab bei einer Schlagweite von $1\frac{1}{2}'''$ durch einen kurzen, dicken Kupferdraht entladen einen hellglänzenden Funken mit schmetterndem Knalle, durch einen langen dünnen Platindraht einen schwachen Funken und bei Einschaltung einer Wasserröhre einen kaum merklichen Funken, während die Schlagweite dieselbe blieb. Die Elektricitätsmenge, welche bei der Schlagweite entladen wird, beträgt nach Rieß immer $^{11}/_{13}$ der ganzen Ladung, so daß $^{2}/_{13}$ derselben übrig bleiben; nähert man daher die Knöpfe auf ½ der Schlagweite, so entsteht ein zweiter schwächerer Funke, durch welchen aber auch wieder nur $^{11}/_{13}$ der Restladung entladen werden, so daß nochmals ein kleiner Rest bleibt, zu dessen Entladung aber die Schlagweite fast bis zur Berührung verkleinert werden muß; die Entladung zerfällt also in mehrere Partialentladungen. Indessen findet selbst einige Zeit nach dieser Berührung, wenn man sie zuerst aufgehoben und dann wiederhergestellt hat, eine 2te, 3te, ja 4te Entladung statt; demnach ist durch die erste Entladung selbst bei der Berührung nicht alle El. neutralisirt worden; es blieb in der Flasche ein Rest zurück, der el. Rückstand oder das Residuum. Franklin erklärt dasselbe dadurch, daß ein Theil der beiden El. von den Belegen abgestoßen in das Innere des Glases eindringt, und erst nach der primären Entladung, wo diese Abstoßung aufhört, allmälig in die Belegungen zurückkehrt, um dort secundäre Entladungen zu veranlassen. R. Kohlrausch, der diese Erscheinungen mit Hülfe seines Sinuselektrometers genau studirt hat, spricht sich indessen gegen diese Erklärung aus und hält den dielektrischen Zustand, in welchen das Glas durch die Wirkung der beiden Belege gelangt, für die Ursache: wenn die Belege entladen sind, so schwindet der dielektrische Zustand (489.), und die von diesem neutralisirt gewesenen El. der beiden Belege werden wieder frei. Nach Versuchen von Wüllner (1874) mögen oft beide Ursachen zusammenwirken, der größte Einfluß scheint aber in dem Dielektricum zu liegen. — Eine Flasche kann auch successive durch zahlreiche Funken entladen werden; die Menge der pos. El. des inneren Beleges ist nämlich offenbar größer als die neg. des äußeren Beleges: stellt man daher die Flasche auf einen Isolirschemel, und entzieht ihr durch Annähern des Fingers auf den Knopf einen pos. Funken, so kann die jetzt verminderte pos. El. nicht mehr alle neg. des äußeren Beleges festhalten, und man kann daher jetzt diesen einen Funken entziehen; dann ist das frühere Uebergewicht des inneren Beleges wieder hergestellt, und es kann ein pos. Funke dem Knopfe entlockt werden u. s. w. Bewiesen wird diese Erklärung durch eine geladene Franklin'sche Tafel mit Pendeln auf beiden Belegen; wird ein Beleg berührt, so fällt sein Pendel und das andere steigt. — Eine Folge des Ueberschusses auf einer Belegung sind auch die Seitenentladungen; man bemerkt dieselben z. B., wenn man die Flasche durch eine Kette von feinem Draht entladet, deren Glieder Spitzen tragen, wobei diese Spitzen Lichtbüschel sprühen, oder, wenn man von dem Schließungsbogen einen Seitendraht nach einem Elektroskop führt.

486 2. Mechanische Wirkungen. Durch den Funken der Flasche wird ein Pulver zerstreut und die Luft heftig aus einander geschleudert: geht der Funke durch ein geschlossenes Gefäß, so schleudert der Luftstoß den Kork heraus (der el. Mörser). Kinnersleys Thermometer besteht aus einem Glasgefäße, das mit einer dünnen Röhre communicirt, und in welches von oben und unten mit Kugeln endigende Theile dieses Schließungsbogens hineingeben. Springt der Funke von Kugel zu Kugel, so wird die Luft stark aus einander geschleudert, drückt auf untenstehende Flüssigkeit und läßt am Steigen derselben in der Röhre die Stärke des Vorganges erkennen. Ein fester Nichtleiter, wie Kartenblätter, Pappendeckel, Glas, wird durchbohrt; das Glas muß aber sorgfältig gereinigt sein; bei durchbohrten Karten und Deckeln sind die Löcherränder nach beiden Seiten aufgeworfen, was für die Gegenströmung im el. Schlage spricht. Sind die beiden Enden des Schließungsbogens, zwischen die man ein Kartenblatt faßt, nicht genau gegenüber, so befindet sich die Oeffnung immer an dem neg. Ende (Lullins Versuch). Viel leichter sind auch die Lichtenberg'schen Figuren mit der Flasche zu erzeugen. Bringt man in dem Schließungsbogen einen dünnen Draht an, so erhebt sich bei weniger starker Ladung ein grauer Dampf von losgerissenen

Theilchen, von Funken durchsprüht; bei stärkerem Schlage erhält der Draht **Einbiegungen**, ie sich bei wiederholten Schlägen vertiefen und vermehren; bei noch stärkerer Entladung lühen die Drähte, zerreißen und zersplittern in angeschmolzene Stücke, und endlich bei der öchsten Stärke zerstäuben sie unter glänzender Lichterscheinung und mit heftigem Knalle. Die Vergoldung eines auf eine helle Grundlage gezogenen Seidenfadens kann zu braunen Streifen auf der Grundlage zerstäubt werden, ohne den Faden zu verletzen. Sind die Enen einer Unterbrechungsstelle in einer eingeschlossenen nichtleitenden Flüssigkeit, so wird dieslbe von einem Funken durchsetzt und das Gefäß oft zerschmettert. Zinnfolie kann in Dunst ufgelöst, Goldschaum zwischen Glasplatten in dieselben eingeschmolzen werden. Bei vielen ieser Versuche thut Henleys allgemeiner Auslader (Fig. 292) gute Dienste. Legt man auf as Tischchen desselben Zucker, Schwerspath, Flußspath, und läßt mehrere Funken durch die örper schlagen, so leuchten sie nachher im Dunkeln.

487 3. **Thermische, physiologische, chemische und magnetische Wirkungen.** Durch den el. Funken einer Flasche oder Batterie sind leicht entzündliche Körper eher zum Brennen zu bringen, als mit der Elektrisirmaschine; auch Pulver kann entzündet werden; u dem Zwecke füllt man es in ein kleines Holzkästchen, in dessen Höhlung von außen Stifte ineinragen; an diese Stifte werden die 2 Theile des Schließungsbogens gebracht; doch muß i denselben ein feuchter Faden eingespannt sein, weil sonst der Funke zu rasch und heftig t, das Pulver fortschleudert, aber nicht entzündet. Sicherer geht dieser Versuch, wenn die Stiftenden mit Knallquecksilber oder noch besser mit Kaliumchlorat und Schwefelantimon edeckt sind. Leichter gelingt das Entzünden von Baumwolle mit Kolophoniumpulver beeut. — Die Erwärmung von Drähten hat Rieß mittels seines el. **Luftthermometers** udirt; dasselbe besteht aus einer luftgefüllten Glaskugel, durch welche eine beiderseits mit ußeren Klemmschrauben verbundene Platinspirale geht, und welche mit einer geneigten und orn umgebogenen, Flüssigkeit enthaltenden Röhre in Verbindung steht, die eine Gradeineilung unter sich hat. In die Klemmschrauben werden die beiden Enden des Schließungsogens gebracht, der Draht wird von dem durchgehenden Strome erwärmt, die Luft ausedehnt und dadurch die Flüssigkeit vorangeschoben; die Größe der Verschiebung gibt ein rtheil über die Stärke der Erwärmung. Ueber den Einfluß der el. Ladung und der Diensionen des Drahtes fand Rieß, daß die Erwärmung des Drathes direct proportional t dem Product der Dichte mit der Quantität der El., aber unabhängig von der Länge es Drahtes und umgekehrt porportional der 4ten Potenz des Radius desselben, daß aber ie freiwerdende Wärmenmenge direct der Länge und umgekehrt dem Quadrat des Radius roportional ist. Ueber den Einfluß des Drahtstoffs beobachtete Rieß, daß die Dauer der ntladung durch den dünnen Draht je nach dessen größerer oder geringerer Leitungsfähigkeit eniger oder mehr verzögert werde, und daß das Erwärmungsvermögen eines Drahtes der rzögernden Kraft des Metalles direct, seiner Dichtigkeit und specifischen Wärme umgekehrt roportional sei. Hieraus leitete Vorßelmann de Heer (1840) den Satz ab, daß die Entdung einer mit derselben El. geladenen Batterie in jedem Schließungsbogen dieselbe Wärmeenge erzeuge; aus diesem Satze und dem Princip von der Erhaltung der Kraft schloß elmholtz (1846), daß die **Entladung** eine **oscillirende** sei. — Faßt man mit der nen Hand den äußeren Beleg und berührt mit der anderen den Knopf, so empfindet man hmerzhafte **Zuckungen**, bei schwachen Schlägen nur im Handgelenke, bei stärkeren uch im Oberarm, bei sehr starken auch durch die Brust, wobei Blutspeien und Lähmung ntstehen kann; man kann den Schlag auch durch bestimmte Körpertheile leiten, indem man e in den Schließungsbogen einschaltet. Auch eine Anzahl von Personen kann gleichzeitig en Schlag empfinden, wenn sie eine Kette bilden und die erste den äußeren Beleg faßt, ie letzte den Knopf berührt. Mit einer el. Flasche kann man kleine, mit einer Batterie rößere Thiere tödten; doch nimmt man nach der Section solcher keine innere Verletzung ahr. Wenn man in der Nähe eines stark mit einer El. geladenen Körpers z. B. eines onductors steht, ohne denselben oder den entladenen Gegenstand zu berühren, so empfindet an im Moment der Entladung dennoch eine el. Zuckung, die man **Rückschlag** nennt; erselbe wird dadurch erklärt, daß der el. Cond. auf den nahen menschlichen (oder auch einen nderen) Körper influenzirend wirkt, die ungleichnamige El. in den zugewandten Theil zieht, ie gleichnamige in den abgewandten Theil stößt; mit der Entladung ist die Ursache der Inuenz verschwunden und es vereinigen sich daher die beiden getrennten El. wieder und erugen so die Wirkung des Rückschlages. Der el. Schlag lenkt auch die Magnetnadel ab, rsetzt chemische Verbindungen, erzeugt in benachbarten gewundenen Leitern el. Ströme; och sind diese Wirkungen bei dem dauernden el. Strome viel bedeutender als bei dem chlage, der nur ein momentaner, oder wenigstens sehr kurz dauernder el. Strom ist.

Die **Potentialtheorie** hat über die Ladung und Entladung der Condensatoren, ie sie die Ansammlungsapparate kurzweg nennt, eine große Anzahl von Sätzen aufgestellt, ie durch ältere oder neuere Versuche bewährt wurden. Wir führen einige der interessantesten rgebnisse an: Die **Schlagweite** wächst bei geringer Potentialdifferenz etwas stärker als

diese, bei größeren Beträgen sind beide einander prop. und bei sehr großen wächst die Schlagweite bedeutend stärker als das Potential, so daß sehr stark geladene Körper wie z. B. die Gewitterwolken sich in die Luft entladen. — Das **Maximum der Energie bei der Entladung** wird durch eine gegebene Quantität erhalten, wenn sie auf eine Cascade geladen wird, durch ein gegebenes Potential aber, wenn es auf eine Batterie gebracht wird. — Die Experimente von Rieß über die **Wärmemenge der Drahtentladung** sind mit den Potentialen verglichen worden und ergeben den Satz: Eine gegebene Quantität von El. erzeugt bei verschiedenen Potentialen Wärmemengen, die dem Potential proportional sind. Die Experimente von Villari (1879—81) über die Wärmemenge des Funkens ergeben den Satz: Die **Wärmemenge des Funkens** ist bei gleichem Potential der Quantität proportional. Die Sätze entsprechen dem Grundgesetze der Potentialtheorie: die Arbeit des Potentials ist gleich dem halben Product aus Quantität und Potential.

488 **Dauer der Entladung, Geschwindigkeit der Elektricität** (Wheatstone 1835, Feddersen 1860, Watson 1748). Wenn vor einem leuchtenden Punkte ein ebener Spiegel sich dreht, so dreht sich auch das Spiegelbild des Punktes, und zwar doppelt so viel als der Spiegel; ist die Drehung langsam, so kann man die einzelnen Punktbilder unterscheiden; geschieht die Drehung rasch, so schmelzen dieselben wegen der Dauer des Lichteindruckes in eine Linie zusammen. Wie lang diese Linie ist, hängt von der Dauer des Lichtpunktes ab und von der Schnelligkeit der Drehung; je länger der Funke dauert, und je rascher der Spiegel sich dreht, desto länger ist auch die Linie; sie enthält doppelt so viel Bogengrade, als der Spiegel in der Zeit des Funkens zurücklegt; man kann sie daher aus der Geschw. des Spiegels und der Funkenzeit berechnen. Legt der Spiegel in 1 Sec. n Rotationen zurück, so ist sein Weg in 1 Sec. = n . 360° und in der Funkenzeit x = nx . 360; folglich ist der Weg des Funkenbildes = 2nx . 360. Beobachtet man nun diesen Weg und findet ihn = α, so ist x = α/720n. Als nun Wheatstone einen Spiegel in der Nähe eines el. Funkens einer Elektrisirmaschine umdrehte, zeigte sich erst bei 800 Rotationen in der Sec. eine Verlängerung des Funkenbildes, und diese betrug doch noch weniger als 1/2°; folglich ist die Dauer des Funkens kleiner als 1/2 (720 . 800), kleiner als 1/1152000 Sec. Größer zeigt sich die Funkendauer der el. Flasche; Wheatstone fand die Dauer des Funkens, der zwischen zwei mit Kugeln versehenen Enden eines metallischen Schließungsbogens überspringt, = 0,000042 Sec. Feddersen fand bei Einschaltung größerer Widerstände noch größere Funkenzeiten, so bei Einschaltung eines 9mm langen Wasserrohres 0,0014, eines 180mm langen Wasserrohres 0,0183 Sec.; auch fand er eine Zunahme der Dauer mit der Schlagweite und der Größe der Batterie. Bei noch genaueren Versuchen zeigte sich, daß von einer gewissen Kleinheit der Widerstände an die Dauer auch zunahm, wenn die Widerstände kleiner wurden. Aus dieser Größe der Flaschenentladungszeit folgt, daß jede Partialentladung wieder aus einer Reihe von Partialentladungen besteht; zuerst entladet sich der Schließungsbogen, was besonders daraus folgt, daß nach der Ladung auch der von der Flasche getrennte Schließungsbogen die Entladung gibt; durch die erste Entladung wird die Luft zur Seite geschleudert, verdünnt, und daher fähig zur Entladung der vom inneren Belege herübergeströmten El., und so wiederholen sich immer schwächere Entladungen. Demgemäß löste bei sehr raschen Rotationen in einem verbesserten Apparate Feddersens das Funkenbild sich in eine Reihe von parallelen, immer feiner werdenden und dichter stehenden Linien auf. Hieraus würde sich die Zunahme der Funkendauer bei der Zunahme des Widerstandes wohl erklären; zur Erklärung aber der Zunahme bei sehr kleinen Widerständen nimmt Feddersen an, daß in diesen Fällen die **Entladung eine oscillirende**, aus entgegengesetzten Entladungen zusammengesetzt sei: bei der ersten Entladung strömen die beiden El. mit einer Art von Trägheit über den Vereinigungspunkt hinaus, kehren dann wieder um, und bringen so eine entgegengesetzte Entladung hervor, was sich noch öfter wiederholt. Diese Oscillationen können aber nur bei kleinen Widerständen auftreten, weil nur dann das Ueberströmen der El. möglich ist. Die Betrachtung des in die Länge gezogenen Funkenbildes auf einer matten Glastafel bestätigte diese Theorie, da dasselbe aus hellen Streifen, durch dunklere Zwischenräume getrennt, bestand; diese oscillirende Entladung wurde von Helmholtz (1846) vorausgesagt, sowie auch von Thomson (1853) und Kirchhoff (1857) theoretisch abgeleitet und von Oettingen (1862) dadurch bestätigt, daß er die Rückstände in der Batterie untersuchte und dieselben der Ocillation gemäß bald pos., bald neg. fand, sowie (1873) dadurch, daß er nach jeder primären Entladung die Flasche secundär geladen fand.

Watson beobachtete schon, daß ein in einen 100m langen Schließungsbogen eingeschalteter Mensch den Schlag zu derselben Zeit empfindet, als er den Funken sieht, daß demnach dieser Weg in unmeßbar kleiner Zeit zurückgelegt wird. Mittels der Methode des rotirenden Spiegels gelang es Wheatstone indeß dennoch, die **Geschwindigkeit der El.** in einem Kupferdrahte zu messen. Von der äußeren Belegung einer Flasche ging ein kurzer Draht mit Kugelende zu dem sogenannten Funkenbrette; ganz nahe bei der ersten Kugel lag eine zweite, von der ein 402m langer Draht in wohl isolirten Windungen zu einer 3ten Kugel

ging, die von der 2ten etwas weiter entfernt, aber ganz nahe bei einer 4ten Kugel lag; von dieser ging abermals ein 402^{m} langer Draht zu einer 5ten Kugel, die wieder etwas weiter von der 4ten, aber nahe bei einer 6ten lag, welche das Ende eines kurzen zum Knopfe des inneren Beleges gehenden Drahtes bildete. Die 6 in gerader Linie liegenden Kugeln bildeten in der Verbindung des inneren und äußeren Beleges, in dem Schließungsbogen 3 Unterbrechungsstellen, gaben also bei einer Entladung der Flasche 3 in gerader Linie liegende Funken; zwischen dem Funken 1—2 bis zu dem Funken 3—4 hatte die El. 402^{m} zurückzulegen, und ebenso von 3—4 bis zu 5—6. Vor dem Funkenbrette wurde nun der rotirende Spiegel aufgestellt; bei einer geringeren Umdrehungszahl sah man immer die 3 in gerader Linie liegenden Funken auch im Spiegel in gerader Linie, woraus folgte, daß in der Zeit, in welcher die El. 402^{m} zurücklegte, die Drehung des Spiegels so gut wie Null war; bei 800 Rotationen in der Sec. aber erschienen die 3 Funkenbilder als gerade, gleich lange Linien, die 2 seitlichen in genau gleicher Höhe, das mittlere gegen die seitlichen etwas verschoben, und zwar bei entgegengesetzter Spiegeldrehung nach entgegengesetzter Richtung. Hieraus folgt, daß die 2 äußeren Funken gleichzeitig entstanden, was wieder für die Gegenströmung im el. Strome spricht; weiter folgte daraus, daß der mittlere Funke später entstand, und zwar um so viel später, als der Spiegel Zeit brauchte zur Drehung gleich der halben Verschiebung des mittleren Bildes. Da nun diese Verschiebung $1/2^{0}$ betrug, so betrug die Zeit zur Spiegeldrehung $= 1/2 / (2.800.360) = 1/1\,152\,000$ Sec.; in dieser Zeit hatte die El. den Weg von 402^{m} zurückgelegt; daher legt sie in einer Sec. einen Weg von $402 \,.\, 1\,152000/7420 = 62\,500$ M. zurück. Demnach wäre die Geschw. der El. im Kupferdrahte = 62500 M., die größte Geschw., die uns auf Erden bekannt ist. Für die El. im Eisendrahte fand Walker eine Geschw. von nur 4000 M., und Fizeau und Gounelle fanden für Kupfer 24200, für Eisen 13500 M. — Die verschiedenen Resultate rühren nach Faraday (1853) davon her, daß die El. von dem umgebenden Medium eine verschiedene Verzögerung erfährt, indem sie durch Influenz dieses Medium mit entgegengesetzter El. ladet, die anziehend und daher verzögernd auf die El. im Drahte wirkt; diese Verzögerung muß in verschiedenen Medien verschieden sein, weil die Influenz verschieden ist. Indessen sind theoretische Betrachtungen von Kirchhoff zu dem Schlusse gekommen, daß die El. in einem widerstandslosen Drahte nur eine Geschw. von 40000 M., gleich der des Lichtes, besitze, und daß sie daher in Widerstand leistenden Drähten noch kleiner sein müsse; auch ist wahrscheinlich, daß die Geschw. mit wachsender Länge abnimmt, daß also genau genommen eine constante Geschw. nicht existirt.

Die Dielektricität (Faraday 1838, Boltzmann 1872—75) ist der Zustand, der in einer nichtleitenden Platte hervorgerufen wird, wenn sich auf beiden Seiten derselben entgegengesetzte Ladungen befinden, sowie die Veränderung, welche hierdurch in diesen Ladungen stattfindet. 489 Diese Veränderung beobachtete zuerst Faraday und nannte die nichtleitende Zwischenschicht dielektrisch und ihren Einfluß spec. Vertheilungsvermögen, was wir jetzt Dielektricitätsconstante nennen. Die *Dielektricitätsconstante* eines *Isolators* ist die Zahl, welche angibt, wie viel mal so stark die Ladung des Condensators bei Anwendung einer Zwischenschicht aus dem Material des Isolators wird, als bei Anwendung einer Luftschicht, unter Voraussetzung gleicher Gestalt und Distanz der Platten und der Zuführung derselben Menge von Elektricität. So ist die Dielektricitätsconstante von Hartgummi = 3,2, d. h. ist zwischen zwei Condensatorplatten eine Schicht von Hartgummi statt einer Luftschicht so wird die Ladung der Condensatorplatte bei gleicher Elektrisirung des Collectors 3,2mal so stark als bei Anwendung einer Luftschicht. Boltzmann hat auch die Dielektricitätsconstante D für Schwefel, Paraffin und Kolophonium bestimmt, und fand für Schwefel $D = 3{,}8$, für Paraffin $D = 2{,}3$, für Kolophonium $D = 2{,}5$. Diese Verschiedenheit zwingt zu dem Schlusse, daß in dem dielektrischen Körper ein el. Vorgang stattfinde; man denkt sich, die neutrale El. jedes Mol. werde vertheilt; die neg. El. gehe nach dem der pos. Platte zugewendeten Ende des Mol. und die pos. nach der der neg. Platte zugekehrten Seite desselben; oder auch sämmtliche Mol. in denen die beiden El. schon in der angegebenen Weise getrennt seien, würden in die eben angegebene Lage gedreht. Diesen Zustand nennt man *dielektrische Polarisation*. Nach Boltzmann unterscheiben sich die Erscheinungen dieses Zustandes wesentlich von denen durch Spuren von Leitung, welche Franklin annahm und jetzt noch Einige annehmen; die dielekt. Polarisation könne nie einen el. Strom hervorrufen, da mit ihrer Herstellung jede el. Bewegung zu Ende sei; außerdem geschehe sie in unmeßbar kurzer Zeit. Zwar habe schon Faraday bei manchen Körpern ein Wachsen der dielekt. Polarisation wahrgenommen; dies sei jedoch einer *dielektrischen Nachwirkung* zuzuschreiben. Ob nun diese Anschauungen Boltzmanns richtig sind oder nicht, so muß doch die Folgerung zugegeben werden, daß ein dielektrisch polarisirter Körper jedenfalls von dem el. Körper, dem er seine Polarisation verdankt, angezogen werde, da die entgegengesetzten Molekülenden dem letzteren näher sind als die gleichnamigen. Diese anziehende Wirkung, welche Boltzmann *dielektrische Fernewirkung* nennt, hat derselbe theoretisch berechnet und durch Versuche bestimmt. Die Uebereinstimmung der Versuchsresultate mit den theoretisch bestimmten spricht

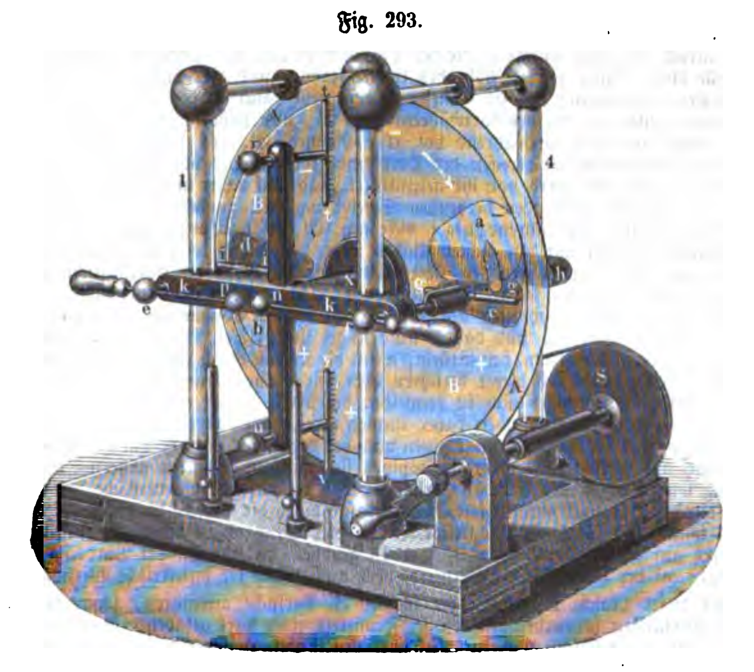
nicht nur für die Richtigkeit der Theorie, sondern auch für die der wichtigen noch anzuführenden Folgerungen. Schon Clausius hat die dielektrische Einwirkung auf eine Franklin'sche Tafel und Leydner Flasche mathematisch untersucht; ausführliche mathematische Theorien gaben Maxwell und noch vollständiger Helmholtz. Aus der Theorie von Helmholtz schloß nun Boltzmann, daß die Anziehung eines el. Körpers auf eine dielektrische Kugel $(D-1):(D+2)$ mal so stark (also kleiner) sei als auf eine gleich große leitende Kugel. Der reciproke Werth dieses Bruches ist z. B. für Schwefel 2; und wirklich ergaben zahlreiche Versuche, daß eine Schwefelkugel von einem el. Körper eine 2 mal kleinere Anziehung erfahre als eine gleich große Metallkugel. Bei diesen Versuchen wurde die El. des el. Körpers in 1 Sec. 2mal gewechselt, ohne daß die Anziehung geändert wurde, woraus Boltzmann schloß, daß die diel. Polarisation in unmeßbar kurzer Zeit erfolge, daß sie also nicht von einer Vertheilung in den Mol., sondern von der Drehung derselben herrühre. Noch höheres Interesse erregt eine andere Anwendung Boltzmanns der von ihm gefundenen Zahlen für D. Maxwell gelangt nämlich in seiner Theorie der Dielektricität zu der Gl. $i=\sqrt{(D\mu)}$, worin i den Brechungsexponent und μ den Coëff. der magn. Induction, dessen Bedeutung hier nicht gegeben werden kann, bezeichnet; es wäre also nach dieser Gl. der Brechungsexponent das geometrische Mittel zwischen der Dielektricitätsconstanten und dem Inductionscoëff. oder, da der letztere nahezu $=1$ ist, gleich der Wurzel aus der Dielektricitätsconstanten; diese Wurzel ist z. B. für Schwefel nahezu $=2$, und ebenso groß ist auch der Brechungsexponent des Schwefels. Noch genauer stellte sich dieser Zusammenhang für 7 verschiedene Gase heraus, deren D Boltzmann (1874) mittels einer Batterie von 300 Elementen untersuchte. Gordon fand (1879), daß D für Glas größer als 3 ist, womit der B.-E. 1,5 desselben nicht stimmt, da er $\sqrt{3}=1,73$ sein müßte; für sehr dichte Glassorten ist jedoch die Uebereinstimmung unzweifelhaft. Hierdurch gelangt die Lehre vom Lichte in einen inneren Zusammenhang mit der Lehre von der El., was auf einen inneren Zusammenhang dieser beiden Naturkräfte deutet, und dennoch eine Möglichkeit eröffnet, zu dem Wesen der El. vorzudringen, dieselbe entweder als eine Bewegung des Aethers, oder, wie es Edlund thut, als Aether selbst aufzufassen. Daß ein innerer Zusammenhang zwischen dem Wesen des Lichtes und dem der Elektricität besteht, geht schon aus einer mathematischen Untersuchung Riemanns (1858) hervor, indem derselbe aus Gleichungen der Elektricitätsbewegung die Geschw. des Lichtes berechnete. Lorenz kam auf Grund ähnlicher Rechnungen, die er mittels der Kirchhoff'schen (1867) Gleichungen der Elektricitätsbewegungen durchführte, zu der Ueberzeugung, daß die Schwingungen des Lichtes el. Ströme sind. — Eine dielektrische Forschung von Silow (1875) bestätigte einen anderen theoretisch von Helmholtz gefundenen Satz: Wenn 2 Mengen El. E und E' in einem diel. Medium auf einander wirken, so wirken sie nur so, wie die Mengen $E:\sqrt{D}$ und $E':\sqrt{D}$ in der Luft. Nach einer eigenen Methode fand Silow für Terpentinöl $D=2,22$ und für 2 el. Massen in Terpentinöl den Helmholtz'schen Satz bestätigt. — Duter beobachtete (1875) eine Ausdehnung des Dielektricums; Röntgen zeigte dieselbe auf der Naturforscherversammlung in Baden (1879): Ein langer, breiter, etwas gespannter Kautschukstreifen wird mit zwei Spitzenkämmen elektrisirt, die mit den beiden Conductoren einer Holtz'schen Elektrisirmasch. verbunden sind; die eintretende Verlängerung beträgt mehr als 1/30 der Streifenlänge. Röntgen hält die Ausdehnung für eine Wirkung der Erwärmung und des Druckes der beiden Condensatorplatten gegen das Dielektricum; auch Boltzmann (1880) nennt sie bei seiner Berechnung Elektrostriction.

490 **Die Holtz'sche Elektrisirmaschine**, Influenzmaschine, Elektrophormaschine (Holtz 1865, Töpler 1865). Die Influenzmaschine gibt einen constanten Strom von Büschellicht oder von schwachen Funken oder auch eine Reihe von regelmäßig auf einander folgenden starken Funken zwischen zwei entgegengesetzt el. Conductorkugeln. Sie beruht auf der multiplicirenden Wirkung der Kuchen. Die **Holtz**'sche Einrichtung derselben ist aus Fig. 293, einer perspectivischen Vorderansicht, und aus Fig. 294, einem schematischen Horizontaldurchschnitte zu erkennen. Diese Maschine enthält zwei ganz nahe beisammenstehende, dünne Glasscheiben, die eine c d (B) (die eingeklammerten Buchstaben beziehen sich auf Fig. 293) mittels Kurbel, Rollen und Schnüren auf der Welle a b (x) sehr rasch drehbar, die andere e f (A) fest, von 4 Haltern (1, 3, 4) aus Hartkautschuk getragen und am Durchgang der Welle mit einer größeren Oeffnung versehen. Die feste Scheibe e f (A) trägt an zwei diametralen Endstellen zwei Kuchen g und h (d und c) von Papier; über g (d) und unter h (c) sind Ausschnitte (a und b) in der festen Scheibe, durch welche Papierzähne i und k in die Nähe der drehbaren Scheibe ragen. Jenseits dieser drehbaren Scheibe stehen, den Papierkuchen gegenüber, also durch die zwei



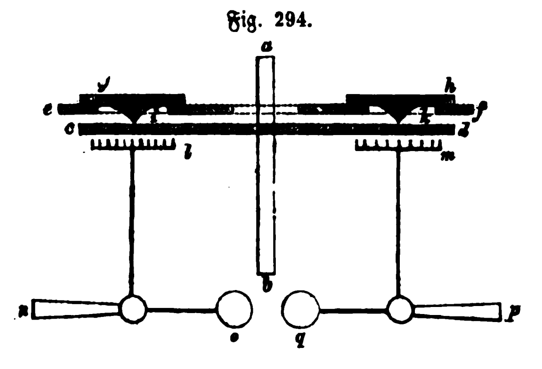
Scheiben von diesen getrennt, die Sauger l und m (ii und gg), von denen Messingstäbe zu den Conductoren no und pq (kp und fn) gehen, deren Kugeln q und o (p und n) durch Verschiebung und Drehung mittels der Handhaben p und n

Fig. 293.



einander genähert und auch ganz aus einander gedreht werden können. Um die Maschine in Wirkung zu bringen nähert man die beiden Conductorkugeln einander bis zur Berührung, reibt ein Stück Hartgummi mit einem Katzenfelle, hält es hinter den einen Papierkuchen und versetzt die Scheibe in Rotation, und zwar so, daß sie sich gegen die Zähne hin dreht; hört man ein knisterndes Geräusch, so zieht man die Conductoren aus einander und erhält dann zwischen den Kugeln einen oder ein ganzes Büschel gebogener, violetter Fäden, die unaufhörlich fortsprühen, so lange man dreht; nimmt man die Kugeln ab, so daß sich Spitzen gegenüberstehen, so entsteht ein aus unzähligen Fünkchen bestehendes Bündel. Legt man auf die Saugerstäbe den kleinen Condensator, eine belegte Glasröhre, so erhält man einen constanten Strom von Funken, die um so größer und knallender sind, je weiter man die Kugeln oder Pole von einander entfernt. Noch stärker, fast wie Pistolenknalle, werden die Funken, wenn man mit beiden Conductoren die innere und äußere Belegung einer elektrischen Flasche verbindet.

Fig. 294.



Rieß giebt von der Wirkung der Masch. folgende Erklärung: Die neg. El. der Hartkautschukplatte, die man zuerst dem rechten Kuchen nähert, wirkt durch Influenz auf den gegenüberstehenden Rechen und Conductor, zieht pos. El. in die Saugspitzen und stößt neg. in den rechten Conductor; die pos. El. der Saugspitzen zieht aus der an dieser Seite abwärts gedrehten Scheibe neg. El., strömt zu derselben und vereinigt sich mit ihr; demnach bleibt an jeder Stelle der Drehscheibe, die hinter den rechten Saugspitzen vorübergegangen ist, pos. El. zurück, die ganze untere Hälfte der Scheibe wird pos. el. Durch die Drehung gelangt jede Stelle dieser Hälfte in die Nähe des linken Zahnes und gibt diesem und dadurch dem linken Kuchen fortwährend pos. El. Dieser Kuchen zieht daher in die Spitzen des ihm gegenüberstehenden linken Conductors fortwährend neg. El., und stößt in die linke Kugel pos. El.; die linke Kugel ist daher fortwährend pos. el. Die neg. El. des linken Rechens zieht aus den an ihr vorbeigehenden Streifen der Drehscheibe fortwährend pos. El., vereinigt sich mit ihr, neutralisirt sie und wird von ihr neutralisirt, und läßt daher in jedem vorbeigegangenen Streifen der sich hier nach oben drehenden Scheibe neg. El. zurück; die ganze obere Hälfte der Scheibe ist daher fortwährend neg.; diese neg. El. gelangt durch die Drehung an den rechten Zahn und geht auf den rechten Kuchen über. Demnach wird der rechte Kuchen sehr bald neg. und bleibt fortwährend so, übernimmt also die Rolle der Hartkautschukplatte, die man folglich bald weglegen kann. Der nun neg. rechte Kuchen zieht fortwährend pos. El. aus dem rechten Rechen und stößt neg. El. in den rechten Conductor; die rechte Kugel ist daher fortwährend neg. el., und da die linke Kugel immer pos. ist, so erklärt sich hieraus der fortwährende Funkenstrom, der entsteht, wenn die Kugeln durch Luft getrennt sind. Wenn die Kugeln oder Spitzen sich direct berühren oder durch einen Draht oder sonst einen Leiter verbunden sind, so vereinigen sich in demselben die 2 El. immer im Momente ihrer Entstehung; diese Vereinigungen finden daher immer nur in ganz kurzen Pausen statt, in eben so kurzen Pausen, als die El. aus den Spitzen nach der drehbaren Scheibe hin ausströmen; diese Pausen sind um so kürzer, je mehr die Spitzen sich mathem. Punkten nähern. Gegen diese Erklärung wurde u. A. der Einwand erhoben, daß die auf der Vorderfläche der drehbaren Scheibe durch die Sauger influenzirte El. unmöglich durch die Scheibe hindurch auf die Zähne gelangen könne, da Glas ein Nichtleiter sei. Dieser Einwand ist durch die Influenz eines Nichtleiters auf sich selbst (Rieß 1873, s. 472.) gehoben, da jede El. der Vorderfläche gleichnamige El. auf der Hinterfläche influenzirt, oder auch durch die dielektrische Wirkung s. 4[illegible].

Mit dieser Masch. lassen sich die meisten el. Versuche ausführen, sogar magn. und chemische Wirkungen hervorbringen, die selbst mittels einer stark geladenen Batterie nur sehr gering ausfallen. Schaltet man ein Rieß'sches Luftthern. zwischen die Spitzen ein, so steigt die Flüssigkeit rasch; läßt man die Funken durch ein enges Glasrohr schlagen, so wird dasselbe bald so warm, daß man Streichhölzchen daran entzünden kann, Phosphor und Schießwolle entzünden sich zwischen den Spitzen sofort, fein zertheilte Kohle kommt ins Glühen, Feuerschwamm entzündet sich nur schwierig, Schießpulver gar nicht. Schaltet man ein mit verdünnten Dämpfen oder Gasen gefülltes Rohr, dessen Enden eingeschmolzene Platindrähte tragen, eine sogenannte Geißler'sche Röhre, zunächst in eine Seitenleitung der sich berührenden Conductoren ein und zieht nach Ingangsetzung der Masch. dieselben aus einander, so zeigt sich ein heller Lichtstrom, der bei Einschaltung von Condensatoren in geschichtetes Licht übergeht. — Läßt man den Funkenstrom direct auf die Haut übergehen, so entsteht ein brennendes und stechendes Gefühl; schaltet man den Körper zwischen den Kugeln ein, so erhält man besonders mit Anwendung der Flasche starke Zuckungen; doch muß eine Luftstrecke in den Schließungsbogen eingeschaltet sein. — Die Wasserzersetzung gelang Holtz nur mit in Glas geschmolzenen Drähten, an denen in feinem, continuirlichen Strome die Bläschen aufstiegen, und zwar am neg. Conductor etwa doppelt so viel als am pos.; da nun das Wasser aus 2 Vol. H und 1 Vol. O besteht, so folgt hieraus, daß *der Wasserstoff an den negativen, der Sauerstoff an den positiven Conductor geht*. Schaltet man in den Schließungsbogen eine Spule ein, auf welche ein Leitungsdraht vielfach gewunden ist, und hängt man in der Spule leicht beweglich eine Magnetnadel auf, so wird dieselbe bei dem Durchgehen des Funkenstromes *aus dem magn. Meridian abgelenkt und strebt, sich auf die Richtung der Windungen senkrecht zu stellen*. Auch nimmt der Nordpol immer dieselbe Lage an und bei entgegengesetzter Richtung des Stromes die entgegengesetzte Lage. Ampère hat eine practische Regel aufgefunden, wie man die Lage des Nordpoles gegen die Stromrichtung im Voraus angeben kann. Die Ampère'sche *Schwimmerregel* lautet: Man denkt sich mit der pos. El. in dem Stromleiter schwimmend und zwar in einer solchen Körperlage, daß man die Nadel vor sich sieht, so hat man den Nordpol zur Linken. Man kann diese Regel in ihrer Umkehrung dazu benutzen, zu finden, wie die pos. El. in einem eine Nadel ablenkenden Leiter fließt: Man denkt sich so in dem Strome schwimmend, daß man die Nadel sieht und den Nordpol zur Linken hat, so hat man den Kopf nach dem neg. und die Füße nach dem pos. Conductor gewendet.

Aufg. 747. Den Unterschied und die Uebereinstimmung der magn. und der el. Grunderscheinungen anzugeben — A. 748. Den Unterschied anzugeben in unseren Vorstellungen über das Innere eines magn. und eines el. Körpers. — A. 749. Die Uebereinstimmung und den Unterschied hervorzuheben in unseren Vorstellungen über das Innere eines unmagn. und eines unel. Körpers. — A. 750. Warum kann man aus einem Menschen Funken ziehen, der auf einem Isolirschemel stehend, einen Harzkuchen mit einem Fuchsschwanze peitscht; welche El. enthält er? — A. 751. Warum kann man an der Anziehung eines el. Körpers durch einen geriebenen Stab die Art der El. nicht erkennen? — A. 752. Der Coulomb'sche Versuch, mit welchem das Entfernungsgesetz (468.) nachgewiesen wurde, bestand noch aus einer 3ten Abtheilung; der Torsionsknopf wurde noch auf 8,5° zurückgedreht; welche Torsion war hierzu nöthig? Aufl.: 637,5. — A. 753. Die el. Abstoßung in der Entf. 1 sei F, die halbe Länge des Wagebalkens r; wie groß ist die Abstoßung nach der Ablenkung α? Aufl.: $F \cos {}^1/_2\alpha / (4r \sin^2 {}^1/_2\alpha)$. — A. 754. Durch zwei Elektricitätsmengen e und e′ werden zwei Ablenkungen hervorgebracht, die durch die Torsionen t und t′ auf die Winkel α und α' gebracht werden; wie verhalten sich die El.? Aufl.: $e' : e = (t' + \alpha') \sin {}^1/_2\alpha' . \tang {}^1/_2\alpha' : (t + \alpha) \sin {}^1/_2\alpha . \tang {}^1/_2\alpha$. — A. 755. Wie wird das Verhältniß, wenn in beiden Fällen bis zur Ablenkung α torbirt wird? Aufl.: $e' : e = (t' + \alpha) : (t + \alpha)$. — A. 756. Wie wird das Verhältniß, wenn die Ablenkung α schon vor dem Versuche hervorgebracht wird? Aufl.: $e' : e = t' : t$. — A. 757. Welches ist der Vorgang der Influenz, wenn ein pos. Körper influenzirt, und welches bei einem negativen? — A. 758. Die el. Anziehung eines pos. Körpers gegen einen unel. durch Influenz zu erklären; ebenso eines negativen. — A. 759. Die Coulomb'schen Gesetze über die Menge der Influenzelektricitäten durch die Drehwage zu finden. — A. 760. Den Vorgang beim Korkkugeltanz zu erklären. — A. 761. Das el. Glockenspiel in seiner el. Wirkung aus einander zu setzen. — A. 762. Aus dem Poisson'schen Grundsatze (478.) abzuleiten, daß bei der Kugel die El. überall gleichmäßig vertheilt ist, und beim Ellipsoid an den spitzigen Scheiteln am stärksten sein muß. — A. 763. Die Magnus'sche Rolle in ihrer el. Wirkung zu erklären. — A. 764. Warum ist Staub auf Conductoren sehr schädlich? — A. 765. Der el. Fisch, der in der Nähe des Conductors frei schwebt, verhält sich verschieden, je nachdem er das spitze oder das stumpfe Ende demselben zuwendet; wie und warum? Aufl.: Im ersten Falle angezogen, im letzten abgestoßen; Spitzenwirkung. — A. 766. Warum muß man, um am Elektrophor einen el. Schlag zu erhalten, zuerst die Form berühren und dann den Schild? And.: Die neg. Schildel. ist abgestoßen. — A. 767. Wieviel mal größer ist die abstoßende Wirkung einer Kugel, wenn sie 8mal soviel El. enthält und 3mal näher kommt. Aufl.: 72. — A. 768. Wie groß muß die Elektricitätsmenge sein, welche in der 5fachen Entf. auf die 7fache Masse die doppelte Anziehung ausübt? Aufl.: $7^1/_7$. — A. 769. Wie groß ist die el. Dichte einer Kugelfläche 5, welche die El. 10 enthält? Aufl.: 2. — A. 770. Zwei gleiche Kugeln enthalten die El. 7 und 12; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 7 : 12. — A. 771. Zwei Kugeln, deren Radien sich wie 7 : 11 verhalten, enthalten dieselbe El.; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 121 : 49. — A. 772. Zwei Kugeln, deren Radien 3 und 5^{cm} sind, enthalten die El. 7 und 10; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 175 : 90.

2. Der elektrische Strom oder der Galvanismus.

1. Entstehung des elektrischen Stromes.

1. Entstehung des elektrischen Stromes durch den chemischen Proceß (Galvani 1789, Volta 1794, Delarive 1836). Der el. Strom ist die fortwährende Gegenströmung und Vereinigung der beiden El. in einem Leiter.

Sehr kurze Zeit dauernde oder momentane Ströme sind schon in der Lehre von der Reibungsel. aufgetreten: Wenn man am Elektrophor die Form mit dem Daumen und den Schild mit dem Finger berührt, so geht durch die Hand ein el. Strom, weil sich dann in der Hand die neg. El. des Schildes mit der pos. der Form vereinigt. Der Schließungsbogen der el. Flasche wird während der Entladung von einem el. Strome durchflossen, indem die pos. El. des inneren Beleges und die neg. des äußeren Beleges in dem Schließungsdrahte einander entgegenströmen und sich vereinigen. Auch mittels der gewöhnlichen Elektrisirmasch. ist ein el. Strom möglich, wenn man die beiden geladenen Conductoren durch einen Leiter verbindet. Doch haben alle diese Ströme nur eine sehr kurze Dauer, sie sind momentane Ströme, die wir zur deutlichen Unterscheidung el. Schläge nannten. Die Influenzmasch. gibt nun zwar einen Strom von el. Schlägen, einen Funkenstrom; die Zeiten zwischen den einzelnen Schlägen sind bei Einschaltung der Flasche größer, kleiner bei Einschaltung des kleinen Condensators, noch kleiner, wenn sich die Conductorkugeln oder die Spitzen ohne Einschal-

tung gegenüberstehen, und am allerkleinsten, wenn dieselben sich direct berühren oder durch einen Leiter verbunden werden. Aber Zwischenzeiten sind auch hier, wenn auch unmeßbar klein, vorhanden, weil eine Entladung immer nur stattfindet nach einer Ausströmung an den Saugspitzen, und weil diese Ausströmung nur bei mathematischen Spitzen continuirlich, bei den wirklichen aber mit Unterbrechungen stattfindet. Es treten demnach in allen diesen Fällen nur momentane Ströme auf, oder auf längere oder kürzere Zeit unterbrochene Folgen solcher el. Schläge. Dagegen eine ununterbrochene Gegenströmung und Vereinigung der beiden El., ein continuirlicher el. Strom läßt sich durch diese Einrichtungen nicht erzielen.

Man erhält den el. Strom durch das Eintauchen zweier verschiedenen Metalle in eine Flüssigkeit, z. B. von Zink und Kupfer in Wasser, dem etwas Schwefelsäure zugesetzt wurde. Verbindet man die hervorragenden Enden der beiden Metallstücke durch einen Draht, so ist dieser Schließungsbogen von einem continuirlichen Strome durchflossen. Man überzeugt sich von dem ununterbrochenen Vorhandensein dieses Stromes dadurch, daß man den Draht an einer Magnetnadel vorbeigehen läßt; die Nadel wird dann ununterbrochen nach einer zu der Drahtrichtung senkrechten Richtung abgelenkt. Aus der Lage des Nordpoles kann man nach Ampères Schwimmerregel erkennen, in welcher Richtung die pos., und in welcher die neg. El. fließt. Man denkt sich so in den Draht hinein, daß man die abgelenkte Nadel sieht und den Nordpol derselben zur Linken hat; man hat dann den Kopf dem Zink, die Füße dem Kupfer zugewendet, woraus hervorgeht, daß die pos. El. vom Kupfer, die neg. vom Zink herkommt. Die Verbindung der zwei Metalle mit der Flüssigkeit, durch welche ein el. Strom entsteht, nennt man ein *galvanisches Element* oder eine *galvanische Kette*, das Zinkende nennt man den *negativen Pol*, das Kupferende den *positiven Pol* der Kette, weil aus dem ersteren die neg., aus dem letzteren die pos. El. herausfließt, was man auch mit dem Elektroskop nachweisen kann. Sind die beiden Pole durch den Schließungsbogen verbunden, so daß der el. Strom stattfindet, so sagt man: *der Strom ist geschlossen*; wird die Verbindung an irgend einer Stelle aufgehoben, wodurch der el. Strom zu Ende ist, so gebraucht man den Ausdruck: *der Strom ist geöffnet*. Die im geschlossenen Strome vorhandene, continuirlich gegenströmende El. wird auch *galvanische Elektricität* genannt. Der el. Strom ist bei geschlossenem Strome nicht blos in den Schließungsbogen, sondern auch in der Flüssigkeit vorhanden; man sieht dies daran, daß beim Schließen des Stromes eine lebhafte Zersetzung der Flüssigkeit stattfindet, was ja bekanntlich geschieht, wenn durch eine Flüssigkeit ein el. Strom geht. Könnte man die an beiden Metallen aufsteigenden Gasbläschen sammeln, so würde man sehen, daß an das Zink Sauerstoff und an das Kupfer Wasserstoff geht, woraus sich ergeben würde, daß der eingetauchte Theil des Zinkes pos., der eingetauchte Theil des Kupfers neg. ist. Dies folgt aber auch schon daraus, daß das hervorragende Zinkende neg. El. liefert; da die El. nur aus der neutralen El. des Zinkes durch Vertheilung in negative und positive entstehen kann, und da die negative immer in das hervorragende Zinkende geht, so muß die positive in dem eingetauchten Zinktheile zurückbleiben; aus ähnlichen Gründen (494.) muß das Kupfer am eingetauchten Theile neg. sein. Die beiden El. der eingetauchten Theile strömen durch die Flüssigkeit zu einander, vereinigen sich und zersetzen hierbei die Flüssigkeit; der el. Strom ist demnach eigentlich ein Kreisstrom, er ist im äußern, metallischen Schließungsbogen von entgegengesetzter Richtung, wie in dem inneren flüssigen Bogen. Um die Richtung zu fixiren, ist man übereingekommen, immer nur die Richtung der pos. El. zu nennen. Sagt man also, der Strom geht im Schließungsbogen vom Kupfer zum Zink, so ist damit die pos. El. gemeint, und von der neg. versteht sich dann die entgegengesetzte Richtung von selbst.

Ueber die *Entstehung des el. Stromes* sind die Physiker noch nicht einig, und der Streit über die Ursache der Entstehung geht bis zur Entdeckung des el. Stromes zu-

rück. Luigi Galvani, Professor der Anatomie zu Bologna, hatte (1789) Froschschenkel auf einen Tisch in der Nähe einer Elektrisirmaschine gelegt und beobachtete Zuckungen an denselben, so oft ein Funke aus dem Conductor sprang. Da er die Erscheinung des Rückschlages, der die Zuckungen erzeugte, nicht kannte, so schrieb er dieselben der thierischen El. zu, die durch den Funken erregt werde. Um nun zu untersuchen, ob die atmosphärische El. einen ähnlichen Einfluß auf die thierische El. habe, hing er mehrere Froschschenkel mit einem kupfernen Haken an einem eisernen Gitter seines Gartens auf; als nun zufällig die am Kupfer hängenden Schenkel das Eisen berührten, entstanden die lebhaftesten Zuckungen; auch diese erklärte Galvani als Aeußerungen der thierischen El.; dieselbe sei in den Muskeln und in den Nerven in entgegengesetzter Art vorhanden, werde durch die Metalle vereinigt, und erzeuge so wie eine Flasche die Muskelzusammenziehungen. Obwohl bei der allgemeinen Annahme dieser falschen Erklärung die ganze Sache eingeschlafen wäre, so hat doch die ganze große aus jener kleinen Beobachtung hervorgegangene Wissenschaft und Technik den Namen Galvanis verewigt. Weiter verfolgt wurde die Erscheinung von Alexander Volta, Professor zu Pavia (1794). Er wiederholte den Versuch Galvanis mit der nahe liegenden Aenderung, statt der zwei Metalle Kupfer und Eisen nur eines zu nehmen. Als nun die Zuckungen ausblieben oder wenigstens sehr unregelmäßig und unbedeutend auftraten, kam er auf den Gedanken, daß die hierbei wirksame El. durch Berührung der beiden verschiedenen Metalle entstehe, und untersuchte demgemäß sorgfältig, ob durch Berührung zweier Metalle auch ohne die Froschschenkel El. auftrete. Da seine und zahlreiche folgende Versuche diese Frage bejahten, so entstand hieraus die Ansicht, der el. Strom entstehe durch Berührung oder Contact; diese Ansicht, die Contacttheorie, welche so viel Geltung fand, daß noch jetzt in manchen Büchern die Abtheilung vom el. Strome die Ueberschrift Contactelektricität führt, stützt sich auf eine Reihe von Versuchen Voltas, die unter dem Namen Voltas Fundamentalversuche bekannt sind.

493 Voltas Fundamentalversuche bedürfen eines sehr empfindlichen, z. B. des Bohnenberger'schen Elektrometers in Verbindung mit dem Condensator. Man nimmt zwei ebene Platten von Zink und Kupfer an isolirenden Handhaben, setzt sie auf einander, nimmt sie dann parallel von einander, und berührt mit der einen Platte den auf das Elektrometer geschraubten Collector, während man den Condensator ableitend mit der Hand berührt. Wiederholt man dies öfter und hebt dann den Condensator ab, so geht das Goldblättchen zu einem der beiden Pole hin, ein Zeichen, daß die Platte el. war. Man kann den Versuch auch mit einer Doppelplatte machen, die aus einer Zink- und einer Kupferplatte durch Zusammenlöthen an einer Kante entstanden ist, oder noch einfacher dadurch, daß man die Zinkplatte an die Stelle des Collectors schraubt und die Kupferplatte wie den Condensator aufsetzt. Bei allen diesen Versuchen zeigt sich das Zink immer, in Berührung mit allen Metallen, und von allen am stärksten pos., das Kupfer neg.; ebenso wird bei der Berührung anderer Metalle mit einander das eine neg., das andere pos. Man hat auch hier die Stoffe in eine sogenannte Spannungsreihe geordnet, in welcher immer das vorausgehende Metall in Berührung mit dem folgenden pos., das folgende neg. wird. Die Spannungsreihe Voltas ist; Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Kohle. Andere Forscher geben die Reihe etwas anders an, wie auch die Differenzen der el. Dichten der einzelnen Plattenpaare verschieden angegeben werden. R. Kohlrausch (1851) fand, wenn die Spannungsdifferenz für das Plattenpaar Zink — Kupfer (Zn | Cu) = 100 gesetzt wird, daß die Differenz Zn | Au = 113, Zn | Ag = 106, Zn | Pt = 107, Zn | Fe = 75, Fe | Cu = 31, Fe | Pt = 32, Fe | Au = 40, Fe | Ag = 30. Die Ursache davon, daß die neutr. El. eines Plattenpaares sich vertheilt und die eine Platte pos., die andere neg. wird, nennt man die elektromotorische Kraft, und die durch Berührung el. werdenden Metalle Elektromotoren der ersten Klasse.

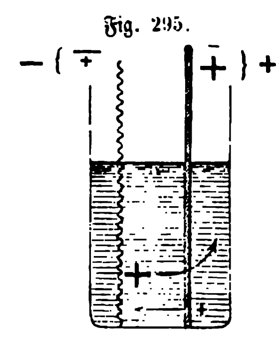
1. Die Elektromotoren der ersten Klasse wirken nach folgenden drei Gesetzen: 1. Jedes Metall der Spannungsreihe wird in Berührung mit dem folgenden positiv elektrisch, das folgende negativ elektrisch. 2. Die Spannungsdifferenz ist um so größer, je weiter die Metalle in der Spannungsreihe auseinander stehen. 3. Die Spannungsdifferenz bleibt dieselbe, wenn 2 Metalle sich in ihrer ganzen Fläche berühren, wenn sie sich nur in einer Kante oder einem Punkte berühren, ja sogar, wenn sie nur durch einen Draht verbunden sind. Daraus ergibt sich die erste Quelle des elektrischen Stromes: Wenn von 2 durch einen Draht verbunden gewesenen Metallen das eine z. B. das Zink positiv und das andere z. B. das Kupfer negativ elektrisch ist, so muß während der Verbindung in dem Draht vom Kupfer zum Zink positive und vom Zink zum Kupfer negative

Elektricität strömen; der Draht enthält während der Verbindung einen elektrischen Strom, dessen negativer Pol das Zink, dessen positiver Pol das Kupfer ist.

Indessen wurde außer der **Berührung zweier Metalle** noch eine zweite Berührungsquelle der El. aufgefunden, nämlich die **Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten**, welche man deßhalb **Elektromotoren der zweiten Klasse** nannte. Becquerel (1824), Pfaff (1840), Buff (1842) und andere Forscher fanden, daß Metalle in Berührung mit Flüssigkeiten meistens neg., diese aber pos. werden; doch ist auch die entgegengesetzte Ladung nicht selten. Buff schraubte eine Platte des Metalls auf ein Elektroskop, legte darauf eine etwas größere Glasplatte und auf diese eine mit der Flüssigkeit getränkte Papierscheibe, welche ein von der Metallplatte heraufgebogener Draht von demselben Metall berührte. Péclets Messungen (1841) ergaben für Zink in Berührung mit verdünnter Schwefelsäure die Eletricitätsmenge — 27, mit verdünnter Salpetersäure — 26, mit Kalilauge — 31, mit Schwefelkalium — 30; für Blei mit diesen 4 Flüssigkeiten — 14, — 13, — 24, — 17, für Eisen — 13, — 8, — 19, — 17, für Kupfer — 2 (mit Salpeters. nicht), — 11, — 22, für Platin + 6, + 4. — 5, — 17. Hieraus ist ersichtlich, daß die Metalle, welche in der Spannungsreihe an der Spitze stehen, am stärksten und zwar neg. el. werden; es sind dies diejenigen Metalle, die bei der Berührung am stärksten von der Flüssigkeit chemisch angegriffen werden; dagegen die weiter in der Spannungsreihe zurückstehenden Metalle (Platin steht z. B. zwischen Gold und Kohle) werden schwach neg. oder gar pos. Bei gewöhnlichen Verhältnissen zeigen sich die El., die durch Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten entstehen, schwächer als die durch Berührung von Metallen unter sich entstehenden El.; in manchen Fällen werden diese von jenen übertroffen. Kohlrausch gibt z. B. an, wenn die El. von Zn | Cu = 100 sei, so entsteht bei der Berührung von amalgamirtem Zink mit Schwefelsäure 149, von Zink mit Schwefelsäure 115, von Platin mit Salpetersäure 149, von Kupfer in Kupfervitriol 21.

Die Elektromotoren der zweiten Klasse wirken nach folgenden drei Gesetzen: 1. Wenn ein Metall in eine Flüssigkeit eintaucht, so wird der hervorragende Theil negativ, der eingetauchte Theil positiv elektrisch. 2. Die Spannungsdifferenz ist um so größer, je weiter vorn das Metall in der Spannungsreihe steht. 3. Wenn zwei Metalle in eine Flüssigkeit eingetaucht sind, so ist das hervorragende Ende des einen positiv und das hervorragende Ende des anderen negativ elektrisch, und zwar ist das in der Spannungsreihe weiter vornstehende negativ und das weiter hintenstehende positiv. Dies erklärt sich folgendermaßen (Fig. 295): Wird Zink für sich allein eingetaucht, so wird es nach dem zweiten Gesetze im hervorragenden Theile stark neg., im eingetauchten Theile stark pos. el.; wird Kupfer für sich allein eingetaucht, so wird sein hervorragender Theil schwach neg. und sein eingetauchter Theil schwach pos. Werden nun beide zusammen eingetaucht, so treibt dieselbe elektromotorische Kraft, welche die starke pos. El. des Zinkes nach unten trieb, diese auch noch weiter in das hervorragende Ende des Kupfers; dort wird diese zwar ein wenig geschwächt durch die schwache neg. El. des hervorragenden Kupfers; diese aber wird aufgehoben und es bleibt ein Ueberschuß von pos. El. im hervorragenden Kupferende. Ebenso treibt die elektromotorische Kraft, welche die schwache pos. El. des Kupfers nach unten trieb, diese auch noch weiter in das hervorragende Zink. Dort wird dieselbe durch einen Theil der stark neg. El. des hervorragenden Zinkes aufgehoben, wodurch diese etwas geschwächt wird; es bleibt jedoch in dem hervorragenden Zinkende ein Ueberschuß neg. El. Daraus ergibt sich **die zweite Quelle des elektrischen Stromes**: Wird der negative Zinkpol mit dem positiven Kupferpol durch einen Draht verbunden, so fließt vom Kupfer zum Zink positive, vom Zink zum Kupfer negative Elektricität. Da die Ströme der zwei Quellen dieselben Richtungen haben, so verstärken sie sich. Diese Erklärung der Entstehung des Stromes nennt man die **Contacttheorie**.

Fig. 295.



Gegen diese Contacttheorie erhob sich, getragen von Delarive (1836) und Faraday die chemische Theorie, welche *den elektrischen Strom als das Product eines chemischen Processes* ansieht. Sie stützt sich darauf, daß in jeder einen el. Strom erzeugenden Kette lebhafte chemische Processe stattfinden, daß die Stärke des Stromes mit der Lebhaftigkeit der chemischen Processe wächst, und daß ohne einen chemischen Proceß durch keine Kette ein nennenswerther el. Strom entsteht. Sie erklärt auch die angeführten Versuche, nach denen Metalle mit Flüssigkeiten und unter sich el. werden, als chemische Processe; bei der Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten seien dieselben leicht wahrzunehmen, und bei der Berührung von Metallen unter sich entständen die chemischen Processe durch die Wirkung von Wasser- und Lufthäuten oder der feuchten Finger. Exner erklärt (1879) die Contactel. zweier Metalle durch die Oxydhaut, die jedes unedle Metall in der Luft sofort erhalte; durch die Oxydation werde das Metall neg. und das Oxyd pos.; das letztere behalte als schlechter Leiter seine El., während die neg. des Metalls bei der Verbindung mit der Erde schwinde; komme nun ein anderes Metall mit dem Oxyd in Berührung, so wirke dessen pos. El. durch Influenz auf das Metall und mache es neg. el. — Die elektrochemische Theorie behauptet weiter, die Elektricitätsmengen, welche scheinbar durch diese Berührungen entständen, seien zu klein, um die Stärke des el. Stromes zu erklären; sie könnten aber dazu ausreichen, den chemischen Proceß einzuleiten; denn durch das Schließen dieses schwachen Stromes verstärke sich bedeutend der chemische Proceß in der Kette und dadurch auch der el. Strom, in ähnlicher Weise wie Verbrennung und Wärmeentwickelung sich gegenseitig steigerten. Am meisten aber spreche gegen die reine Contacttheorie das Princip von der Erhaltung der Kraft, nach welchem eine Kraft unmöglich aus Nichts erzeugt werden könne, und eine solche Erzeugung aus Nichts sei die Ableitung der starken Kraft des el. Stromes aus der Berührung, bei welcher die Arbeit Null betrage. Man kann sich die Erzeugung des el. Str. in gleicher Weise denken wie die der Wärme; wie bei der chemischen Vereinigung die zusammenströmenden Mol. durch den Zusammenstoß in schwingende Bewegung gerathen, die ihre Wärme ausmacht, so kann auch eine andere, uns noch unbekannte molekulare Bewegung entstehen, deren Aeußerungen wir El. nennen. Nach dieser *elektrochemischen Theorie* bilden die zwei Contactquellen nur den Beginn, die Einleitung des Stromes, dem Streichhölzchen vergleichbar, durch welches das Feuer unter dem Dampfkessel entzündet wird. Wie dessen Wärme den Anstoß zu dem gewaltigen chemischen Processe der Verbrennung gibt, der die Dampfspannung erzeugt, so bringen die Contactquellen schwache chemische Processe hervor, die den el. Strom verstärken u. s. w.

Die *Potentialtheorie* sagt statt Spannungsdifferenz Potentialdifferenz, ohne hiermit die beiden Ausdrücke zu identificiren. Potential und Spannung bedeuten bekanntlich (480.) nicht dasselbe; wo aber eine Spannung ist, ist auch ein Potential. Die Potentialdifferenz der beiden Pole ist doppelt so groß, als das Potential des pos. Poles, da das Pot. des neg. Poles ebensoviel unter Null liegt, als das des pos. über Null.

494 **Die galvanischen Batterien** bestehen aus mehreren mit einander verbundenen galvanischen Ketten; das Kupfer der ersten Kette wird mit dem Zink der zweiten metallisch verbunden, das Kupfer der zweiten Kette mit dem Zink der dritten u. s. w. Ist die El. des Zinkes einer Kette — e und die des Kupfers + e, so hat das erste Zinkende einer Batterie von n Ketten die El. — ne und das letzte Kupferende die El. + ne.

Dieselbe elektromotorische Kraft nämlich, welche die pos. El. des eingetauchten ersten Zinkes in das hervorragende Kupferende hineinstößt, treibt diese durch die metallische Verbindung in das zweite Zink und durch dieses und die Flüssigkeit in das zweite Kupferende, so daß dieses die doppelte pos. El. besitzt; diese strömt durch die metallische Verbindung, durch das dritte Zink und die Flüssigkeit auf das dritte Kupferende über, wodurch dieses die dreifache pos. El. erhält. Ebenso gewinnt das vierte Kupferende die vierfache und das letzte Kupferende die n fache pos. El. Ganz in derselben Weise erklärt sich die n fache neg. El. des ersten Zinkendes. Die neg. El. nimmt nach dem Anfange der Batterie hin zu, die pos. nach dem Ende der Batterie hin; in der Mitte sind beide gleich stark und heben sich auf. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, daß in der Flüssigkeit immer vom Zink zum Kupfer pos., und vom Kupfer zum Zink neg. El. strömt, daß also das eingetauchte Kupfer neg. ist. Dieser innere Strom zersetzt die Flüssigkeit. Wie nun 2 Met. der Volta'schen Spannungsreihe durch Berührung entgegengesetzt el. werden, so auch alle Elemente; dieselben bilden demnach eine vollständige Spannungsreihe, an deren pos. Ende Kalium und Wasserstoff, am neg. der Sauerstoff stehen; deßhalb geht immer das pos. Element der zersetzten Flüssigkeit, z. B. der H an das neg. K. und das neg. z. B. der O an das pos. Z. oder allgemeiner: der pos. Strom führt das pos. Element, der neg. Strom das neg. Element mit sich fort. Galvanische Batterien gibt es mancherlei Constructionen.

1. Die Volta'sche Säule (1800) besteht gewöhnlich aus Doppelplatten, die aus je einer Zink- und einer Kupferplatte zusammengelöthet sind. Auf einer Grundplatte wird isolirt zwischen drei oder vier Glassäulen eine Doppelplatte, das Zink nach unten, gelegt, darauf wird ein in gesäuertem Wasser angefeuchtetes Tuchläppchen gebreitet, auf dieses kommt wieder eine Doppelplatte, das Zink nach unten, dann wieder ein Tuchscheibchen, und so wird weiter gebaut bis zur letzten Doppelplatte; dann wird ein Schraubendeckel auf die Glasstäbe befestigt und mittels einer Schraube die Säule ein wenig befestigt. Das unterste Zink und das oberste Kupfer haben keine Bedeutung. Das erste Element ist das Zink der obersten Doppelplatte, das feuchte Läppchen und das Kupfer der zweiten Doppelplatte; jenes Zink ist der negative Pol der Säule. Das letzte Element ist das Zink der vorletzten Doppelplatte, das unterste feuchte Läppchen und das Kupfer der letzten Doppelplatte: dies bildet den pos. Pol. Verbindet man die beiden Pole durch einen Draht, so wird derselbe von einem el. Strome durchflossen, der besonders starke physiologische und Funkenwirkungen hat. An dem oberen Ende kann man durch ein Elektroskop freie neg., am unteren freie pos. El. nachweisen, deren Stärke nach der Mitte hin abnimmt und in der Mitte = Null ist, wodurch die Säule einige Aehnlichkeit mit einem Magnet gewinnt; auch durch die Abnahme der Zuckungen, die man erfährt, wenn man nach und nach immer mehr nach der Mitte zu liegende Stellen mit beiden Händen berührt, ist die Abnahme der freien El. nach der Mitte zu erkennbar. Wird die eine El. durch ableitende Verbindung eines Poles mit der Erde fortgeführt, so wird die Menge der freien El. am anderen Pole verdoppelt, die Ablenkung des Elektroskops an demselben wird stärker, und diese Art von El. ist mit abnehmender Stärke bis zum ersten Pole auf die ganze Säule verbreitet. Weil durch das Gewicht der Platten die Flüssigkeit der Läppchen herausgepreßt wird, wodurch leitende flüssige Streifen an den Seiten entstehen, welche die El. durch Vereinigung neutralisiren, so wird die Volta'sche Säule bald nach ihrem Aufbau schwach.

2. Zambonis trockene Säule (Behrens 1804, Zamboni 1812). Man klebt einen Bogen Goldpapier (Messing) und einen Bogen Silberpapier mit den Papierseiten zusammen, schneidet daraus kleine, gleich große Stückchen, schichtet sie, immer das eine Metall nach derselben Seite gerichtet, in einer wohl isolirenden Glashülse auf einander, und schließt dieselbe durch 2 Messingkapseln. Der feuchte Leiter ist hier durch das verkleisterte, hygroskopische Papier vertreten, die beiden Metalle sind Kupfer und Zinn; die eine Messingkapsel ist pos., die andere neg.; die el. Differenz hält Jahre lang, kann auch ziemlich bedeutend sein, ohne indessen Stromwirkungen hervorzubringen, weil das Papier nur langsam leitet. Die wichtigste Anwendung dieser Säule ist das Behrens'sche und das Bohnenberger'sche Elektroskop. Auch ein elektrisches Perpetuum mobile ist durch dieselbe möglich.

3. Voltas Becherapparat (1800), **Cruikshanks Trogapparat** (1802), **Wollastons Säule** (1815) und **Hares Spirale** (1821) suchen den angeführten Nachtheil der Volta'schen Säule zu vermeiden. Volta stellte zu dem Zwecke einzelne Becher auf, in welche er je eine Zink- und eine Kupferplatte brachte, und immer das Kupfer des vorhergehenden mit dem Zink des folgenden Bechers verband. Cruikshank setzte an Stelle der größeren Becherzahl einen einzigen Holztrog mit Seitenfugen, in welche je eine Doppelplatte eingesetzt wurde; durch Ausgießen des Wassers ist der Apparat außer Gang gesetzt. Wollaston verbesserte Voltas Bechersäule dadurch, daß er alle Platten an einem gemeinschaftlichen Holzrahmen befestigte und sie zusammen in die passend untergestellten Becher oder in einen Trog einsetzte, welche Form vielfache Umänderungen erfahren hat. Hare wickelte zwei durch Tuchstreifen vor metallischer Berührung bewahrte Bleche von Kupfer und Zink um einen Holzcylinder, der mittels eines Trägers in ein passendes Flüssigkeitsgefäß eingesetzt wurde.

495 **Die constanten Ketten.** Alle Batterien, welche aus zwei Metallen und einer Flüssigkeit bestehen nehmen rasch an Stromstärke ab. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, daß der el. Strom auch durch die Flüssigkeit geht. Hierdurch wird das Wasser zersetzt in Sauerstoff und Wasserstoff; der Sauerstoff geht an das Zink und der Wasserstoff zum Kupfer. Das Zink vereinigt sich mit dem Sauerstoff zu Zinkoxyd, einer erdigen, nicht leitenden Masse, welche das Zink bedecken und so die Einwirkung der Flüssigkeit auf das Zink, wie auch die Leitung hemmen würde, wenn nicht die Schwefelsäure vorhanden wäre, die mit dem Zinkoxyd Zinkvitriol, ein im Wasser lösliches Salz bildet ($H_2SO_4 + ZnO = ZnSO_4 + H_2O$) und dadurch das Zink in metallischer Berührung mit der Flüssigkeit erhält; hieraus ergibt sich denn die Nothwendigkeit der Schwefelsäure. Wenn so die schädliche Einwirkung des Sauerstoffs beseitigt ist, so bleibt doch noch die des Wasserstoffs; derselbe wird durch die Anziehung des Kupfers auf demselben

verdichtet und bildet eine Lufthaut, welche die Einwirkung der Flüssigkeit auf das Kupfer verhindert, welche als schlechte Leiter die fortwährend nothwendigen Strömungen der El. unmöglich macht, und welche endlich selbst einen entgegengesetzten Strom, den sogen. Polarisationsstrom hervorruft, weil ja an der Stelle des in der Flüssigkeit negativen Kupfers nun eine positive Gasschicht mit der Flüssigkeit in Berührung steht. Hierdurch wird die Wirkung der Kette bald geschwächt; um sie für längere Zeit constant zu halten, um also constante Ketten zu erzielen, muß der Wasserstoff beseitigt werden. Dieses geschicht meistens durch Einführung eines Stoffes, der leicht Sauerstoff abgibt und dadurch den Wasserstoff zu Wasser oxydirt; damit dieser oxydirende Stoff sich nicht mit dem gesäuerten Wasser menge, ist er meistens in eine sehr poröse Thonzelle eingeschlossen, deren Porosität so groß sein muß, daß sie Gasatomen den Durchgang gestattet, und daß sie sich durchfeuchtet und so einen guten Leiter bildet, ohne die Flüssigkeiten durchtreten zu lassen. Kann man hierbei noch eine Flüssigkeit als Oxydationsmittel anwenden, in welcher das zweite Metall der Kette an seinem hervorragenden Ende pos. oder noch schwächer neg. als Kupfer wird, so gewinnt die Kette auch an Kraft. Dieser letzte Gedanke ist durchgeführt in Groves und in Bunsens Kette.

1. **Groves Kette** (1839). Zink taucht in verdünnte Schwefelsäure, Platin in Salpetersäure, welche in einer Thonzelle in dem Schwefelsäuregefäß steht. Diese Kette ist sehr kräftig, weil das Platin in der Salpetersäure am herausragenden Ende stark pos., am eingetauchten Theile also an sich neg. wird, weil also die vom eingetauchten Platinende abgestoßene El. die des Zinkes nicht wie in der Zinkkupferkette vermindert, sondern vermehrt, und weil ebenso die vom eingetauchten Zinkende abgestoßene El. die pos. El. des Platins vermehrt. Das Zink hat nach Kohlrausch durch seine Berührung mit Schwefelsäure die El. — 149, (s. 493.), es erhält von dem eingetauchten die Salpetersäure berührenden Platin ebenfalls — 149, und durch Verbindung mit dem Platin — 107, folglich ist seine El. = — 405. Ebenso hat das Platin durch seine Berührung mit Salpetersäure die El. 149, es erhält von dem eingetauchten Zink 149 und durch Berührung mit demselben 107, zusammen + 405. Die Constanz der Kette wird dadurch erhalten, daß der bei der Zersetzung des Wassers frei werdende Wasserstoff der Salpetersäure Sauerstoff entzieht, sich dadurch zu Wasser oxydirt, welches allmälig die Salpetersäure verdünnt, während das durch Reduction der Salpetersäure entstehende Stickoxyd sich theils unter Bildung von Stickstoffdioxyd in der Salpetersäure löst und dieselbe grün färbt, theils in die Luft entweicht und sich dort mit Sauerstoff zu den orangefarbigen Dämpfen von Stickstoffdioxyd (NO_2) vereinigt: $2(HNO_3) + 6H = H_2N_2O_6 + 6H = H_2N_2O_3 + 3(H_2O) = N_2O_2 + H_2O + 3(H_2O) = 2(NO) + 4(H_2O)$. Diese Dämpfe von Stickstoffdioxyd (NO_2) sind eine der Schattenseiten dieser wegen ihrer Stärke vortrefflichen Kette; sie sind der Gesundheit schädlich und verderben die metallischen Apparate. Man muß die Kette deßhalb in einem gesonderten, zugigen Raume aufstellen oder sie fest verschließen. Eine weitere Schattenseite der Grove'schen Kette ist wegen der Kostbarkeit des Platins ihr hoher Preis. Hierin ist vortheilhafter

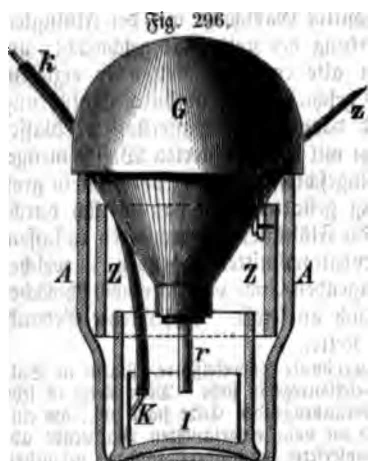
2. **Bunsens Kette** (1842). Zink taucht in Schwefelsäure und Kohle in Salpetersäure. Da man die Kohle leichter in großen, hohlen Cylindern anfertigen kann, so kommt hier meist die Salpetersäure in ein Glasgefäß, in dieses der Kohlencylinder, darein die, verdünnte Schwefelsäure und einen Zinkkolben enthaltende, Thonzelle. Die Constanz wird hier in derselben Weise wie bei Groves Kette bewirkt; die Störung durch Stickstoffdioxyd tritt auch hier auf. Die Kohlencylinder erhält man, indem man die passende Form mit einem Gemisch von 2 Theilen backender Steinkohle und 1 Theil Gaskohle in Pulverform füllt und mäßig glüht; dann werden sie in concentrirte Zuckerlösung getaucht, getrocknet und dann in Weißgluth gebracht. Die so erhaltene Kohle ist klingend, fest, gut leitend und steht in der Spannungsreihe noch hinter Platin, gibt also sehr starke Ketten. Der Nachtheil der Dämpfe ist vermieden in

3. **Daniells Kette** (1836). Zink taucht in Schwefelsäure und Kupfer in Kupfervitriollösung $CuSO_4$. Die Constanz erklärt sich folgendermaßen: Außer der Zersetzung des Wassers in O und H findet auch eine Zersetzung des Kupfervitriols statt in SO_4 und Cu, das Cu geht an das Kupfer; ein Atom O von SO_4, das nach dem Zn zugeht, vereinigt sich mit dem H zu Wasser, wodurch das H unschädlich wird, und das restirende SO_3 mit H_2O zu H_2SO_4, wodurch die Schwefelsäure, die das ZnO unschädlich gemacht hat, wiederhergestellt wird. Die Kette ist nicht so stark wie die vorgenannten; ihre elektrische Differenz ist nur 100 + 149 — 22 = 227 gegen 405 bei Groves Kette; indessen ist sie stark genug für die meisten galvanischen Zwecke und hat deßhalb eine weit verbreitete Verwendung, da sie nicht so theuer wie Groves Kette und nicht schädlich ist und daher in Zimmern immer auf-

gestellt bleiben kann. Nach längerer Zeit schlägt sich auch auf der Thonzelle Kupfer nieder und schwächt die Wirkung; sie hat daher vielfache Abänderungen erfahren; eine der nützlichsten ist

4. Meidingers Kette (1859). Zink taucht in Bittersalzlösung, Kupfer oder Blei in Kupfervitriollösung, ohne poröse Scheidewand. Die gebräuchlichste Einrichtung derselben ist aus Figur 296 zu ersehen. Auf dem Absatze des großen Glasgefäßes AA sitzt die Zinkrolle Z; auf dem Boden steht ein zweites, Kupfervitriollösung enthaltendes, kleines Glasgefäß, an dessen Wand die Kupfer- oder Bleirolle K angelehnt ist, von welcher ein mit Guttapercha überzogener Kupferdraht k als positiver Pol hinausgeht. Den Deckel des Ganzen bildet das Glasgefäß G, das ganz mit Kupfervitriolstücken gefüllt ist und mit seinem offenen unteren Ende r in das kleine Glasgefäß mündet, wodurch die Kupfervitriollösung immer concentrirt bleibt. Der übrige Raum des großen Glasgefäßes ist mit Bittersalzlösung gefüllt. Wenn die Kette ruhig steht, so diffundirt die schwerere Lösung so langsam in die leichtere nach oben, daß selbst nach Monaten das Zink noch keine Spur von Kupfer zeigt. Die Constanz dieser Kette dauert Jahre lang, doch ist ihre Kraft nicht groß.

Fig. 296.



5. Leclanchés Kette (1868). Kohle in Braunstein in einer Thonzelle, ein Zinkstab in Salmiaklösung. Die Constanz wird dadurch erzielt, daß der Braunstein durch Abgabe von O den H zu Wasser oxydirt, während Salmiak und Zinkoxyd mit einander Chlorzink und Ammoniak bilden. Diese Kette ist stärker als Meidingers; jedoch läßt ihre Stärke beim Gebrauche bald nach, weßhalb sie für intermittirende Benutzung, wie z. B. elektrische Signalglocken u. drgl. am geeignetsten erscheint.

6. Chrom-Ketten. Poggendorff schlug zuerst (1842) vor, in Bunsens Element die dämpfebildende Salpetersäure durch ein Gemisch von doppeltchromsaurem Kalium und Schwefelsäure zu ersetzen, weil diese beiden Stoffe ebenfalls den wasserstoffverzehrenden Sauerstoff entwickeln: $K_2Cr_2O_7 + 4\,H_2SO_4 = Cr_2S_3O_{12} + K_2SO_4 + 4\,H_2O + O_3$. Buff zeigte später, daß bei dieser Chromkette die Thonzelle ohne Nachtheil wegbleiben kann; hierdurch wurde die Constr. von Tauchbatterien möglich, bei denen die Zinkplatten mittels Drehen einer Kurbel in die gefüllten Gefäße herabgelassen und beim Nichtgebrauch wieder aufgewunden werden; dieselben haben für viele, insbesondere medicinische Zwecke ausgebreitete Anwendung; noch mehr Anwendung hat das Flaschenelement, eine mit obiger Mischung halbgefüllte Flasche, an deren schließenden Metalldeckel die immer eintauchenden Kohlenplatten befestigt sind, während 1 oder 2 Zinkplatten an Messingstängelchen herausgezogen und durch Schräubchen außerhalb der Flüssigkeit festgehalten werden können.

7. Secundäre oder Polarisationsbatterien. Eine secundäre Batterie besteht aus 2 Platten eines wenig angreifbaren Metalls z. B. Platin oder Blei, die in gesäuertes Wasser tauchen; werden die vorragenden Enden mit einer anderen Batterie in Verbindung gebracht, so wird das Wasser in O und H zersetzt; der O scheidet sich an der pos., der H an der neg. Platte aus, und es bleiben auf den Platten verdichtete Schichten der Gase, sogenannte Lufthäute sitzen. Wird nun der Strom der Batterie, der primäre Strom unterbrochen, so ist die vorher pos. Platte mit dem neg. O und die vorher neg. Plattte mit dem pos. H überzogen; die beiden Lufthäute erzeugen demnach einen neuen, den secundären Strom, der auch Polarisationsstrom heißt, weil die el. Polarität der Platten nun der früheren entgegengesetzt ist. Ritter hat schon 1803 seine Ladungssäule aus einerlei Metallplatten mit salzwassergetränkten Tuchscheiben aufgebaut und mit derselben nach dem dargestellten Princip starke Ströme erhalten. Grove construirte (1839) seine nahe verwandte Gassäule, aus H- und O-Häuten an Platinblechen bestehend. Sinsteden schlug (1854) Bleiplatten für secundäre Batterien vor, und Planté hat seit 1859 zahlreiche secundäre Batterien aus Blei angefertigt. Damit dieselben in kleinem Raume eine möglichst große Oberfläche darbieten, windet man die beiden durch Gummistreifen getrennten Platten spiralförmig auf und taucht die entstehende Rolle in ein Gefäß mit gesäuertem Wasser. Bei der Verbindung mit der primären Batterie bildet sich an der Oberfläche der einen Platte Bleisuperoxyd, wodurch dieselbe sich braun überzieht, während die andere ein graukörniges Ansehen erhält, was vielleicht auf eine Art von Hydrogeniren hindeutet. Die so vollendete secundäre Batterie muß nicht sofort benutzt werden, sondern behält ihre allerdings schwächer werdende Kraft Tagelang, ja ist nach einer Woche noch

nicht völlig entladen. Sie ist vortrefflich für Glühversuche, kann aber auch zu chemischen Zersetzungen u. a. Stromwirkungen dienen; jedoch nimmt ihre Kraft im Gebrauche rasch ab. Dieser Nachtheil soll in dem *Accumulator* von Faure (1881) beseitigt sein; dieser vielgepriesene Apparat unterscheidet sich von Plantés Batterie nur dadurch, daß die Bleiplatten mit einer dicken Schicht von Mennige überzogen sind; durch die Wirkung der primären Batterie wird die eine Schicht noch höher, zu Bleisuperoxyd oxydirt, die andere aber zu Blei reducirt.

2. **Entstehung des elektrischen Stromes durch Temperaturunterschiede,** 496
Thermoelektricität, Thermoströme. Seebeck (1821) löthete auf ein Wismuthstäbchen einen gebogenen Kupferstreifen so auf, daß ein geschlossener Rahmen entstand, innerhalb dessen auf einer Spitze eine Magnetnadel schwebte. Wurde das Rähmchen in den magnetischen Meridian gestellt und die nördliche Löthstelle durch eine Spiritusflamme erwärmt, so wurde die Nadel so abgelenkt, daß sich ihr Nordpol nach Osten richtete; hieraus folgte, daß durch die Erwärmung ein el. Strom entstanden war. Man nannte diesen Strom Thermostrom und die geschilderte Vorrichtung eine *thermoelektrische Kette*. Die Richtung des Stromes findet man, wenn man sich so in den Kupferstreifen gelegt denkt, daß man die Nadel sieht und den Nordpol zur Linken hat; dies ist der Fall, wenn man mit dem Kopfe nach Süden liegt; der positive Strom hat dann die Richtung von den Füßen zu dem Kopfe, also hier von Norden nach Süden. *Der Thermostrom geht also in der wärmeren Löthstelle vom Wismuth zum Kupfer, in der kälteren vom Kupfer zum Wismuth.* Erwärmt man die südliche Löthstelle, so wird der Nordpol nach Westen abgelenkt, der Strom hat also die umgekehrte Richtung, wodurch die eben ausgesprochene Regel bestätigt wird. Die Ablenkung der Nadel dauert so lange als die Temperaturdifferenz der Löthstellen. Die Thermoströme entstehen nicht blos bei der Berührung von Kupfer und Wismuth, sondern mit irgend zwei Metallen, wenn man sie zu einem Stromkreise verbindet und den Verbindungsstellen eine verschiedene Temperatur gibt, entweder durch Erwärmen oder Abkühlen einer Löthstelle; die Kraft des Stromes ist aber bei verschiedenen Verbindungen sehr verschieden. Seebeck hat die Metalle in eine thermoelektrische Spannungsreihe so geordnet, daß die el. Differenz um so größer ist, je weiter die Metalle in der Reihe aus einander stehen, und daß in der wärmeren Löthstelle der Strom immer von einem vorhergehenden zu einem folgenden Metall geht. Diese Spannungsreihe ist: Wismuth, Nickel, Kobalt, Platin, Kupfer, Blei, Zinn, Gold, Silber, Zink, Eisen, Arsen, Antimon. Für diese Reihe gilt dasselbe Gesetz wie für Voltas Spannungsreihe: die thermoel. Erregung irgend zweier Glieder ist gleich der Summe der Erregungen aller Zwischenglieder; sie ist also am stärksten zwischen Wismuth und Antimon. Doch erreicht die Stärke einer Thermokette bei Weitem nicht die einer galvanischen Kette. So ist nach Pouillet die Spannungsdifferenz einer Wismuth-Argentankette nur = 0,0059 einer Daniell'schen Kette. Für kleine Temperaturdifferenzen ist die Spannungsdifferenz der Temperaturdifferenz proportional; bei größeren wächst sie langsamer als diese; auch ändert sich die thermische Spannungsreihe bei hoher Temperatur. Man kann den Thermostrom verstärken, indem man mehrere Thermoketten zu einer *Thermosäule* verbindet.

Nobilis Thermosäule (1830) besteht aus 3—4cm langen Wismuth- und Antimonstäbchen, die so zusammengelöthet sind, daß alle geradzahligen Löthstellen auf der einen, alle ungeradzahligen auf der anderen Seite sich befinden, und daß sämmtliche Stäbe parallel liegend und durch eine isolirende Substanz getrennt, ein kleines Parallelepipedon bilden, das in ein Gehäuse von gleicher Form eingeschlossen ist und an diesem seine Pole hat; doch gibt es auch Thermosäulen, an denen die Löthstellen eine Linie bilden statt einer Ebene, lineare Thermosäulen, und andere Formen. Die Seiten der Löthstellen können durch Schieber abgesperrt werden; öfter findet man an ihnen Trichter, welche die Wärmestrahlen in größerer Menge zuleiten sollen. In Verbindung mit einem für Thermoströme geeigneten Multiplicator gibt die Thermosäule das feinste Thermometer, mit welchem man nach Melloni Temperaturdifferenzen von 1/5000° noch messen kann, und welches daher in der Wärmelehre

von großer Wichtigkeit ist. Ueberhaupt wird die Thermo-El. vielfach zu Temp.-Messungen benutzt.

Wie sich die Stellung eines Metalls in der Spannungsreihe mit seiner Härte, Structur, Reinheit u. s. w. ändert, so nehmen auch die Legirungen ganz unberechenbaren Stellen ein, ja zeigen meist, ebenso wie natürliche Schwefelmetalle, viel kräftigere thermoelektrische Wirkungen unter einander und mit den Metallen als die Metalle unter sich. Davon hat Marcus (1860) Anwendung gemacht zur Construction kräftiger Thermosäulen. Die eine Legirung besteht aus 10 Kupfer, 6 Zink und 6 Nickel, die andere aus 12 Antimon, 5 Zink und 1 Wismuth; ein solches Marcus'sches Element hat eine Kraft = 1/25 derjenigen eines Bunsen'schen Elementes. Mit einer Marcus'schen Batterie läßt sich eine Anzahl der schwächern galvanischen Wirkungen zeigen. Sie besteht aus langen, unter einem Winkel zusammenstoßenden Doppelstäben, welche so aneinander gelegt sind, daß man die Winkelstelle durch einen längeren Gasheerd erhitzen, die beiden Endstellen durch untergestellte mit Wasser gefüllte Tröge abkühlen kann. Da die Legirung zerbrechlich ist und die Löthstellen leicht oxydiren, so hat Noe (1876) das pos. Metall, dessen Zusammensetzung durch den Tod des Erfinders unbekannt zu bleiben scheint, mit dem negativen Neusilberstreifen und einem Eisenstab durch Guß vereinigt und so eine durch die Hitze nicht angreifbare Thermosäule (Fig. 297) von solcher Stärke hergestellt, daß sie für el. Kohlenlicht ausreicht. Die langen schmalen Rechtecke am Umfange der cylindrischen Anordnung sind Kupferplatten, die zur Abkühlung der äußeren Enden der Elemente dienen; dieselben sind radial um den Heizraum gelegt, von dem die Wärme durch die dünnen radialen Eisenstäbe nach den Stellen geleitet wird, wo ein pos. Cylinder mit seinem neg. Neusilberstreifen verbunden ist, der schief über den Zwischenraum weg nach der folgenden Kupferplatte geht. Hauck sucht diese Einrichtung zu erhalten und zu verbessern. Auch Clamond hat die Elemente ringförmig um den Heizmittelraum angeordnet; das pos. Metall, eine Legirung von Zink und Antimon, ist in abgestumpften Sectoren in mehreren über einander befindlichen Ringen um die Heizröhre aufgestellt; an der Innenseite eines Sectors ist das neg. Eisenblech angelöthet, das durch den Sectorzwischenraum weit über den folgenden Sector hinaus- und in Flügelform wegen der Abkühlung um denselben herumgeht und an der Außenfläche angelöthet ist. Mit einem verbesserten Apparat (1879) soll ein Lichtbogen von 40 bec Carcel erzeugt und die Stärke von 120 Bunsen erreicht worden sein.



Fig. 297.



Wenn an Löthstellen durch Wärme El. entsteht, so muß umgekehrt an solchen durch El. Wärme oder Kälte hervorgerufen werden (Peltier 1834). Geht durch die eine Kugel eines Differentialthermometers ein Wismuth-Antimon-Stäbchen, so sinkt die Flüssigkeit auf der Seite dieser Kugel, wenn ein Strom vom Antimon zum Wismuth geht, was Erwärmung anzeigt; dagegen steigt die Flüssigkeit und zeigt Abkühlung an, wenn der Strom vom Wismuth zum Antimon geht. Peltiers Kreuz besteht aus einem Wismuthstabe und einem Antimonstabe, die sich unter rechtem Winkel kreuzen; von zwei verschiedenen Enden gehen Drähte um eine Nadel, an zwei andere gelangen Stromdrähte; wird der Strom geschlossen, so daß also durch die Kreuzungsstelle ein Strom geht, dann bewegt sich die Magnetnadel, zeigt bei einer Stromrichtung Erwärmung, bei der entgegengesetzten Abkühlung an. Quintus Icilius (1857) und Frankenheim (1858) fanden, daß die Temperaturänderung der Löthstelle der Intensität des erregenden Stromes proportional sei. Quintus Icilius leitete dabei den Strom durch 30 zu einer Thermosäule verbundene Antimon-Wismuth-Elemente; die unpaaren Löthstellen wurden dann stärker, die paarigen weniger stark erwärmt, als sie durch den galvanischen Strom an sich erwärmt würden; diese Differenzen mußten nun, als der erregende Strom unterbrochen wurde, selbst einen Thermostrom hervorrufen, aus dessen Wirkungen auf ein Galvanometer jenes Gesetz sich ergab. Frankenheim benutzte das Peltier'sche Kreuz in derselben Weise.

Die Thermosäulen liefern nur schwache Ströme, und auch die Batterieströme sind für Wirkungen im Großen nicht ausreichend, da es unmöglich ist, Batterien von [illegible] von Elementen in wirkungsgleichem Stande zu erhalten. Außerdem sind die kräftigsten Batterien nur für kurze Zeit constant, und die für längere Zeit constanten sind nicht kräftig. Endlich ist die Wartung und tägliche Ernährung der Batterien zeitraubend und [illegible].

Bei dieser Unzuverlässigkeit, Schwäche und Kostspieligkeit der galvanischen Batterien ist aber eine andere Art der Erzeugung der el. Ströme höchst wünschenswerth, besonders Ströme von beliebiger Stärke zu gewinnen, was durch die magnet-elektrischen Maschinen annähernd erreicht ist.

2. Stärke des elektrischen Stromes.

497 Die **Stromstärke** oder Stromintensität ist diejenige Elektricitätsmenge, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt eines Leiters fließt.

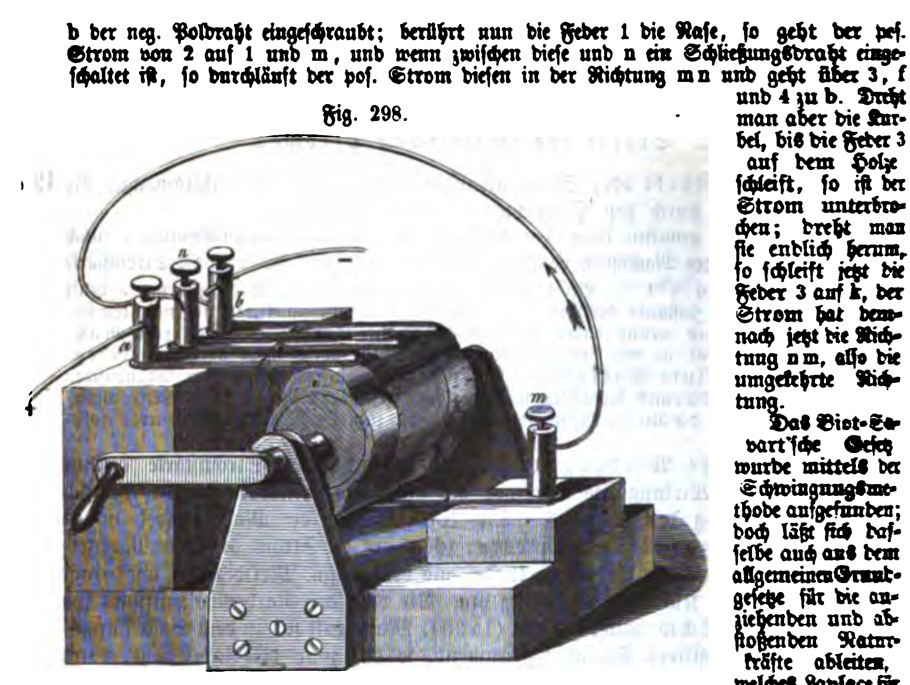
Sie wird also gemessen durch den Ausdruck ε/t. Da die Elektricitätsmenge ε (nach 469.) in dem absoluten Maßsystem von der Dimension $m^{1/2}l^{3/2}t^{-1}$ ist, so ist die Stromstärke von der Dimension $m^{1/2}l^{3/2}t^{-2}$. Bei diesem absoluten Maße der Elektricitätsmenge ε denkt man sich dieselbe im Zustande der Ruhe in einem Körper angesammelt, im sogenannten statischen Zustande; man nennt daher diese Messungsweise das **elektrostatische Maßsystem**. Dasselbe hat in der Praxis keine Anwendung, um so mehr aber das **elektromagnetische absolute Maßsystem**, das wir erst nach Erkenntniß der magnetischen Wirkungen des el. Stromes betrachten können. Auf diesen und den chemischen Stromwirkungen beruhen auch die älteren Messungsmethoden, die zum Verständnisse der neueren nothwendig sind.

Galvanische Wirkungen, die zur Messung der Stromstärke benutzt werden, sind die Wirkung des Stromes auf eine Magnetnadel und die chemisch zersetzende Wirkung des Stromes. Die Wirkung auf die Magnetnadel ist in **Oersteds Gesetz** (1820) ausgesprochen: Geht ein el. Strom an einer Magnetnadel vorbei, so lenkt er die Magnetnadel aus dem magn. Meridian ab nach einer zur Stromrichtung senkrechten Richtung hin. Die Lage des Nordpoles bestimmt sich nach **Ampères Schwimmerregel** (1820): Man denkt sich in dem Schließungsbogen mit dem positiven Strome schwimmend, so daß man die Nadel sieht; dann hat man den Nordpol zur Linken. Die Stärke der ablenkenden Wirkung ist umgekehrt proportional dem senkrechten Abstande des Drehpunktes der Nadel vom Stromleiter (**Biot-Savarts Gesetz** 1820). Deutlicher und schon bei einem schwachen Strome erkennbar wird diese Ablenkung mit einer **astatischen Doppelnadel**, welche aus zwei ganz gleichen, in entgegengesetzter Richtung parallel mit einander verbundenen Nadeln besteht, die daher von dem Erdmagnetismus zwei ganz gleiche, aber entgegengesetzte Wirkungen erfahren, welche sich einander aufheben. Noch deutlicher wird die Wirkung, wenn der Schließungsdraht um die Nadel vielfach herumgeht, weil schon jeder der 4 Theile einer Windung in demselben Sinne auf die Nadel wirkt. Da die Wirkung auf die Nadel hierdurch vervielfacht wird, so nennt man eine mit Windungen versehene Nadel **Multiplicator** (Schweigger 1821). Eine zum Messen eingerichtete Verbindung einer leicht drehbar aufgehängten astatischen Nadel mit dem Multiplicator bildet das **Galvanometer** (Nobili 1830).

Das Oersted'sche und das Ampère'sche Gesetz werden mit Gestellen nachgewiesen, welche aus nach verschiedenen Richtungen gehenden Stäben zusammengesetzt sind, an denen freischwebende Magnetnadeln in verschiedenen Stellungen angebracht werden können, und an deren Enden durch Klemmschrauben die Enden der zwei von den Polen einer Batterie herkommenden Drähte, der sogenannten Poldrähte befestigt werden können. Gewöhnlich schaltet man in einen dieser Drähte einen Apparat ein, mittels dessen man den Strom leicht öffnen, schließen oder umkehren kann, einen Apparat, den man Stromunterbrecher, Stromwender, **Gyrotrop** nennt; dem Drehen dieses Apparates ist auch die Magnetnadel immer nach den beiden Gesetzen gehorsam. Eine der einfachsten Constructionen (Fig. 298) besteht aus einem kleinen durch eine Kurbel drehbaren Holzcylinder, dessen beide Enden von Messingringen g und b umfaßt sind; von jedem Ringe geht eine abgerundete Messingnase f u. k bis in die Mitte des Cylinders an 2 sich diametral gegenüberliegende Stellen. Das Gestell dieses Cylinders besteht aus einem horizontalen und einem verticalen Brettchen; auf dem ersten sitzt eine Klemmschraube m, auf dem zweiten drei Klemmschrauben a, n, b, von denen Federn ausgehen; die Federn 2 und 4 schleifen auf den Ringen, die Feder 3, die in der Mitte sitzt, berührt entweder das Holz oder eine Nase. In die Klemme a wird der pos., in

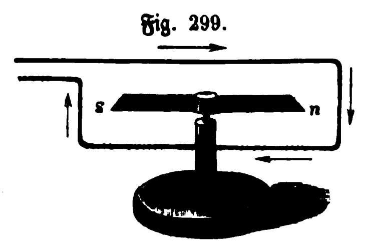
b der neg. Poldraht eingeschraubt; berührt nun die Feder 1 die Nase, so geht der pos. Strom von 2 auf 1 und m, und wenn zwischen diese und n ein Schließungsdraht eingeschaltet ist, so durchläuft der pos. Strom diesen in der Richtung m n und geht über 3, f und 4 zu b. Dreht man aber die Kurbel, bis die Feder 3 auf dem Holze schleift, so ist der Strom unterbrochen; dreht man sie endlich herum, so schleift jetzt die Feder 3 auf k, der Strom hat demnach jetzt die Richtung n m, also die umgekehrte Richtung.

Fig. 298.



Das Biot-Savart'sche Gesetz wurde mittels der Schwingungsmethode aufgefunden; doch läßt sich dasselbe auch aus dem allgemeinen Grundgesetze für die anziehenden und abstoßenden Naturkräfte ableiten, welches Laplace für diesen Fall folgendermaßen ausdrückt: die Kraft, mit der jedes Element des Leiters auf den Magnetpol wirkt, ist umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes des Poles vom Element. Ampère gibt diese Ableitung in folgender Weise; a b und $a_1 b_1$ seien zwei parallele, unendlich lange Ströme und m ein Magnetpol; zieht man nun zwei Grade mcc_1 und mdd_1 von m an die Ströme a b und $a_1 b_1$, welche nur einen sehr kleinen ∡ cmd mit einander bilden, so ist die Wirkung der hierdurch abgeschnittenen Stromelemente cd und $c_1 d_1$ auf den Pol diesen Längen direct und nach dem Grundgesetze umgekehrt proportional den Quadraten der Abstände; diese Kräfte verhalten sich also wie $(cd/cm^2) : (c_1 d_1 / c_1 m^2)$. Nun ist $\triangle cmd \sim c_1 md_1$, also ist $cd : cm = c_1 d_1 : c_1 m$; sind ferner die senkrechten Abstände des Poles von den Strömen $= a$ und a_1, so ist auch $cm : c_1 m = a : a_1$. Durch Einführung dieser Werthe in das Kraftverhältniß ergibt sich dieses $= a_1 : a$, womit Biot-Savarts Gesetz bewiesen ist. Da umgekehrt dieses Gesetz durch die Versuche nach der Schwingungsmethode feststeht, so folgt aus seiner Geltung auch die des Laplace'schen Grundgesetzes.

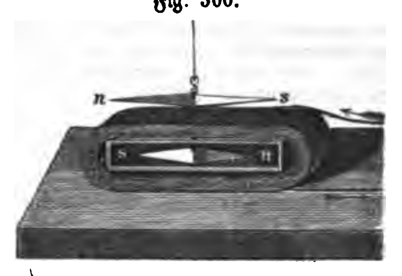
Fig. 299.



Die Wirkung einer Windung des Stromes um eine Nadel herum erfährt man leicht an Fig. 299. In dem oberen Theile der Windung hat man sich den Schwimmer mit dem Rücken nach oben, mit den Füßen links vorzustellen; sein linker Arm tritt dann hinter die Papierfläche, dorthin richtet sich also auch der Nordpol; in dem zweiten Theile steht der Schwimmer auf dem Kopfe, das Gesicht nach links, der linke Arm und der Nordpol sind wieder hinten; in dem dritten Theile liegt der Schwimmer auf dem Rücken mit den Füßen nach rechts, der linke Arm und der Nordpol treten wieder nach hinten; in dem vierten Theile steht der Schwimmer aufrecht, das Gesicht nach rechts; der linke Arm tritt auch hier aus der Papierfläche nach hinten. Also wirken alle 4 Theile einer Windung in derselben Weise, eine Windung hat schon einen größeren Effect, als ein vorbeigeführter Draht. Wenn nun viele Windungen möglichst nahe und auf einander liegen, so wirken sie alle in gleicher Weise, wenn sie durch das Umwinden nicht zu weit von der Nadel wegkommen. Demnach muß der Draht des Multiplicators (Fig. 300) möglichst fein und die zur Isolirung der Windungen von einander nothwendige Ueberspinnung des Drahtes mit Seide möglichst dünn sein. Die Dünne des Drahtes ist freilich durch

andere, später zu besprechende Verhältnisse beschränkt. Die astatische Doppelnadel erfährt keinen Einfluß vom Erdmagnetismus, weil auf jeder Seite derselben sich zwei entgegengesetzte Pole befinden, von denen der eine vom Nordpole der Erde gerade so stark angezogen als der andere abgestoßen wird, vorausgesetzt, daß der Magnetismus der beiden Nadeln genau gleich groß ist. Da dies nur sehr schwer, ja mit absoluter Genauigkeit gar nicht zu erreichen ist, so wird eine astatische Nadel wohl immer noch eine gewisse Richtkraft haben; diese ist aber bei guten Nadeln so gering, daß auch ein schwacher Strom das Uebergewicht gewinnt und bei der Anwendung des Multiplicators die Nadel senkrecht stellt. Natürlich dürfen sich die beiden Theile einer Nadel nicht auf derselben Seite des Multiplicators befinden, sonst würde die Wirkung desselben auf die beiden Theile eine entgegengesetzte und beinahe gleich große sein und demnach sich selbst aufheben. Wird aber (Fig. 300) der eine Theil der Nadel in das Innere der Windungen gebracht und der andere außen gelassen, so ist die entgegengesetzte Wirkung auf die entgegengesetzte äußere Nadel der Richtung nach dieselbe wie auf die innere Nadel, so daß die beiden Einflüsse sich abermals verstärken.

Fig. 300.



Die elektrische Wasserzersetzung (Carlisle 1800) ist die zweite galvanische Wirkung, die zur Strommessung benutzt wird. Der verbreitetste Wasserzersetzungsapparat besteht aus einem trichterförmigen Gefäße, von einem Ständer getragen, durch dessen Boden 2 entweder in das Glas eingeschmolzene oder in einem Korkpfropfen steckende Platindrähte gehen, die mit vertical aufrecht stehenden Platinblechen endigen und von Klemmschrauben herkommen. Ueber diesen Platinblechen hängen an federnden Klemmen des Ständers zwei oben geschlossene graduirte Glasröhren, wie das Gefäß mit Wasser gefüllt, über die Platinbleche gestülpt und nach der Methode der pneumatischen Wanne in das Gefäßwasser getaucht. Werden nun die Klemmschrauben mit einer Batterie verbunden, so werden die Platinbleche zu Polen derselben, und beim Schließen des Stromes zeigen sich Gasströme an den Platinblechen, die in den Glasröhren aufsteigen und dieselben allmälig füllen; am negativen Pole sammelt sich doppelt so viel Gas als am positiven; nimmt man die Gläschen nach der Füllung heraus, so zeigt sich das erstere Gas durch sein Verbrennen als Wasserstoff, das letztere durch das Aufflammen eines glimmenden Spanes als Sauerstoff; das Wasser wird also in seine zwei Bestandtheile, Wasserstoff und Sauerstoff in demselben Volumverhältnisse zerlegt, wie sie sich mit einander zu Wasser verbinden, und wie sie mit einander gemengt Knallgas bilden. Würde man die beiden Pole in ein Gefäß gebracht haben, so hätte man in demselben das Gasgemenge Knallgas erhalten. 498

Galvanische Meßapparate. 1. Das Voltameter (Jacobi 1839). Da die durch das Wasser fließende El. das Wasser zersetzt, da sie um so mehr Wasser zersetzt, je länger derselbe Strom dauert, und da die zersetzten Wassermengen bei gleich bleibender Stromstärke proportional mit der Zeit, also auch mit der Elektricitätsmenge zunehmen, und da endlich nach Faradays Untersuchungen die chemische Wirksamkeit gleichen Schritt hält mit der magnetischen, so ist die Quantität eines in einer bestimmten Zeit zersetzten Wasserquantums ein Maß für die Menge der in dieser Zeit herbeigeflossenen El., ein Maß für die Stromstärke. Die Menge des zersetzten Wassers aber wird erkannt aus der Menge des entstandenen Gases; da indeß hierbei die Scheidung der Gase nur störend ist, so gibt man einem Wasserzersetzungsapparat eine solche Einrichtung, daß sich beide Gase also Knallgas, in einem Meßgefäße sammeln; diese Einrichtung ist das Voltameter. Als chemische Einheit der Stromstärke hat Jacobi denjenigen Strom vorgeschlagen, der in einer Minute 1 ccm Knallgas, bei 0° Temperatur und 760 mm Luftdruck erzeugt. 499

Das Voltameter besteht aus einem Glasgefäße mit einem Bleipfropfen, durch welchen in Glasröhrchen wohl isolirt zwei Kupferdrähte zu 2 möglichst nahe beisammen stehenden Platinlamellen gehen. Das Gefäß wird mit Schwefelsäure gefüllt, da dieselbe ein viel besserer Leiter als Wasser ist und doch Wasser genug enthält; dann werden die beiden Kupferdrähte mit den Poldrähten verbunden. Das Wasser wird nun zersetzt, und das entstandene Knallgas steigt durch eine im Bleipfropfen befestigte Glasröhre in ein nach dem Princip der pneumatischen Wanne aufgestelltes, genau graduirtes Glasgefäß; man merkt sich die Zeit des Beginnens der Zersetzung und läßt dieselbe bis zu einer bestimmten Füllung weiter gehen; dann unterbricht man sie, merkt sich wieder die Zeit, sowie die Temp. t und den Barometerstand b. Ist das Vol. des in n Min. entstandenen Knallgases $= v^{ccm}$, so ist die Stromstärke $= vb / (760 (1 + 0{,}003665t)n)$. So leicht die Benutzung des Voltameters ist, so eignet es sich doch nicht zu allgemeiner Messung, weil die Flüssigkeit der Stromleitung einen Widerstand entgegensetzt, der einen Theil des Stromes aufzehrt, so daß bei geringen Stromstärken gar keine Zersetzung stattfindet und stärkere Ströme immer eine zu kleine Maßbestimmung erfahren. Genauer sind die magnetischen Meßapparate.

2. *Die Tangentenbussole* (Pouillet 1837) besteht aus einem an einer Stelle aufgeschnittenen Kupferringe von etwa 3^{dm} Durchmesser, der vertical so auf einem Dreifuße befestigt ist, daß die Schnittenden mit Klemmschrauben in Verbindung stehen, welche die Poldrähte aufzunehmen bestimmt sind und so einen Strom durch den Kupferring leiten. In der Mitte des Ringes befindet sich eine Kreistheilung, deren Mittelpunkt mit dem des Ringes zusammenfällt, und über welcher auf einer Spitze oder besser an einem Coconfaden eine Magnetnadel schwebt. Wird der Ring in die Ebene des magnetischen Meridians gestellt, so wird von einem durch den Ring gehenden Strome die Nadel abgelenkt; die Ablenkung ist um so größer, je stärker der Strom ist, und zwar bilden die Stromstärke und die Ablenkung folgendes Gesetz: *die Stromstärke ist direct proportional der Tangente des Ablenkungswinkels.*

Beweis. Auf die Nadel wirken zwei Kräfte, der Erdmg. m und die Stromstärke i, die erste Kraft sucht die Nadel in den Meridian zurückzudrehen, die zweite sucht sie in eine zum Meridian senkrechte Richtung zu stellen; die Nadel kommt zur Ruhe, wenn die Ablenkung α so groß ist, daß die drehenden Wirkungen, die Drehungsmomente der beiden Kräfte einander gleich sind. Die Kräfte können aber nicht mit ihren ganzen Beträgen m und i auf die Nadel wirken, sondern nur mit den Componenten derselben, die auf der Nadel senkrecht stehen. Da nun m im Meridian wirkt, so ist eine zur Nadel senkrechte Comp. die Gegenkathete des Winkels α, folglich $= m \sin \alpha$. Die Stromstärke wirkt in einer zum Meridian senkrechten Richtung, folglich steht eine zur Nadel senkrecht gefällte Linie dem Winkel $90 - \alpha$ gegenüber; folglich ist diese Comp. $= i \sin (90 - \alpha) = i \cos \alpha$. Die Drehungsmomente dieser Comp. sind durch Multiplication derselben mit der halben Nadellänge zu erhalten; folglich ist $\frac{1}{2} l \, . \, i \cos \alpha = \frac{1}{2} l \, . \, m \sin \alpha$, woraus $i = m \, . \, \tang \alpha$, womit das Gesetz bewiesen ist. Bei der Ableitung dieses Gesetzes wird vorausgesetzt, daß die Stromwirkung auf die abgelenkte Nadel dieselbe sei, wie auf die nicht abgelenkte; da aber die magn. Theilchen in beiden Fällen eine ganz verschiedene Lage haben, so trifft diese Voraussetzung nicht zu, und es gilt daher das Gesetz nur genau für kleine Ablenkungen und kleine Nadeln; die Nadeln müssen 5mal kleiner als der Dm. des Ringes sein; und um die kleinen Ablenkungen genau messen zu können, ist eine Spiegelablesung von Poggendorff angebracht. Genaue Resultate gibt Wiedemanns *Tangentenbussole* (1851). Dieselbe besteht aus einer kurzen, dicken Kupferhülse, in welcher statt einer Nadel ein dicker, magnetisirter Stahlspiegel schwebt, dessen Stellung ebenfalls durch Fernrohr und Skala beobachtet wird; zu beiden Seiten der Hülse sind auf Schlitten verschiebbare Drahtspiralen angebracht, die bis über die Hülse geschoben werden können. Durch diese seitliche Aufstellung des Stromes gegen die Magnetnadel wird der Fehler obiger Tangentenbussole vermieden, wie Helmholtz (1849) gezeigt hat; denn wenn sich die Nadel dreht, so entfernt sich ihre eine Hälfte von dem Stromkreise, während sich die andere nähert. Nach Gaugain ist die Tangente des Ablenkungswinkels am genauesten der Stromstärke proportional, wenn der Abstand der Nadelmitte von der Ringmitte ¼ des Ringdm. beträgt; hierauf beruht Gaugains *Tangentenbussole* (1853), in welcher sich die Nadel in der angegebenen Stellung gegen den Ring befindet.

3. *Die Sinusbussole* (Pouillet 1837) enthält einen drehbaren Stromkreis, mit welchem man bei dem Versuche der durch den Strom abgelenkten Nadel so lange nachgeht, bis Nadel und Strom in einer Ebene liegen. Die Stromstärke ist dann proportional dem Sinus des Ablenkungswinkels.

Denn weil der Stromring und die Nadel in einer Ebene liegen, so steht die ablenkende Kraft des Stromes schon senkrecht auf der Nadel, fällt also mit ihrer senkrechten Comp. zusammen; folglich ist jetzt das Drehungsmoment des Ringes = $\frac{1}{2}l \cdot i$; da dieses gleich dem des Erdmag., = $\frac{1}{2}l \cdot m \sin\alpha$ ist, so ergibt sich $i = m \sin\alpha$. Poggendorff hat Verbesserungen an der Sinusbussole angebracht, namentlich dadurch, daß die Nadel an einen Coconfaden gehängt wurde. Siemens und Halske haben derselben durch solide Constr. eine für telegraphische Zwecke geeignete transportable Einrichtung gegeben, und durch Anbringen zweier Theilungen, innerhalb und außerhalb des Nadelkreises sie auch als Tangentenbussole brauchbar gemacht; man nennt diese Einrichtung Sinus-Tangentenbussole.

4. Das Galvanometer dient meist nicht zum Messen der Stromstärke, sondern zur Nachweisung der Existenz sehr schwacher Ströme. Indessen kann es auch gerade zur Messung schwacher Ströme benutzt werden, da seine Wirkung ja mit der der Tangentenbussole übereinstimmt. Doch ist nur innerhalb der ersten 10 bis 20 Grade die Stromstärke der Tangente der Ablenkung proportional; für größere Ablenkungen muß der Galvanometerkreis auf praktische Weise durch Anwendung von der Stärke nach bekannten Strömen graduirt werden. Ein zu Messungen besonders geeignetes Galvanometer hat Buff (1853) construirt; dasselbe hat an 20 000 Windungen eines Kupferdrahtes von $0{,}168^{mm}$ Dicke, die auf einen cylindrischen Rahmen von 60^{mm} Länge und 25^{mm} Dm. gezogen sind, in dem eine Nadel von 5^{mm} Länge und $2{,}5^{mm}$ Breite schwebt; parallel mit derselben spielt auf der Gradeintheilung ein nicht magnetischer Zeiger. Dieses Galvanometer kann vollständig als Tangentenbussole benutzt werden. — Für die starken Ströme der Elektrotechnik sind in den letzten Jahren vielfach neue Galvanometer construirt worden, welche die Stromstärke oder auch die elektromotorische Kraft direct in absolutem Maße (506.) angeben.

Die magnetischen Meßinstrumente sind den chemischen weit vorzuziehen, sie sind nicht blos empfindlicher, sondern sie geben auch die Stromstärke im Augenblicke des Messens, während das Voltameter nur die durchschnittliche Stromstärke während der Zersetzungszeit gibt. Nur geben sie die Stromstärke nicht in einer leicht definirbaren Einheit; indessen kann man z. B. die Angaben der Tangentenbussole in chemischem Maße ausdrücken. Es seien i und A zwei in chemischem Maße ausgedrückte Stromstärken, welche an der Tangentenbussole die Ablenkungen α und 45^0 hervorrufen, so ist $i : A = \text{tang}\alpha : \text{tang}\,45^0 = \text{tang}\alpha : 1$; hieraus $i = A\,\text{tang}\alpha$. Um also eine Stromstärke in chemischem Maße auszudrücken, die an der Bussole die Ablenkung α erzeugt, muß man die Tangente dieser Ablenkung mit einem für den betreffenden Apparat constanten Factor A der sogenannten Reductionsconstanten, multipliciren. Um aber diese Constante zu finden, benutzt man ebenfalls die Gleichung $i = A\,\text{tang}\alpha$, aus welcher $A = i/\text{tang}\alpha$. Man setzt in einen und denselben Stromkreis ein Voltameter und eine Tangentenbussole, die erstere gibt in der in 1 Minute entwickelten Gasmenge den Zähler i, die letztere die Ablenkung α, aus denen dann A zu berechnen ist.

500 **Das Ohm'sche Gesetz** (1827). Die Stromstärke ist direct proportional der elektromotorischen Kraft der Kette, und umgekehrt proportional dem Widerstande des Stromkreises. Der Widerstand des Stromkreises ist direct proportional seiner Länge und dem specifischen Leitungswiderstande seines Stoffes, und umgekehrt proportional seinem Querschnitte.

Beweis. Unter Stromstärke an einer bestimmten Stelle eines Stromkreises versteht man die Elektricitätsmenge, die an dieser Stelle in der Zeiteinheit durch den Querschnitt fließt, vorausgesetzt, daß der Stromkreis in einem stationären Zustande sei, daß also durch jeden Querschnitt eine gleiche Menge von El. fließe, daß an dem einen Pole eine gewisse Menge freier pos. El. e, an dem anderen Pole eine gleiche Menge freier neg. El $-e$ sei, welche gegen einander abfließen. Dieses Abfließen ist aber nur möglich, wenn eine Stelle größerer Dichtigkeit sich neben einer Stelle geringerer Dichte befindet, wenn also die el. Dichte von beiden Polen nach der Mitte des Schließungsbogens hin abnimmt. Es sei ab Fig. 301 ein Stromkreis, a und b seine beiden Pole; die freien El. seien als senkrechte Ordinaten y an den betreffenden Stellen des Stromkreises aufgetragen, und die Endpunkte der Ordinaten durch eine zusammenhängende Curve gf verbunden, so stellt diese den Verlauf der freien El. in dem Leiter dar. Die Neigung dieser Curve über einem gewissen Punkte m, der um die Abscisse x von dem pos. Pole a entfernt ist, stellt die Abnahme der el. Dichte von diesem

Punkte m zu dem nächsten Punkte n vor, das el. Gefälle, wie Ohm jene Abnahme nennt. Das Gefälle ist um so größer, je größer die Linie pq im Verhältnisse zu oq, je größer also das Verhältniß pq : oq d. i. die trigonometrische Tangente des Winkels poq ist. Bezeichnen wir die kleinen Stücke der Abscisse x und der Ordinate y durch dx und dy, so ist das Gefälle ausgedrückt durch dy / dx. Da nun die Annahme berechtigt ist, daß die durch das unendlich klein gedachte Stückchen mn fließende Elektricitätsmenge, die Stromstärke oder Intensität i, dem Gefälle proportional ist, so können wir setzen: i = C (dy / dx), worin C eine von den Umständen bedingte Größe bedeutet, die wir folgendermaßen finden. Wir bezeichnen die El., welche in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit des Querschnittes mit dem Gefälle 1 fließt, mit k, und setzen diese Werthe in obige Gleichung, wobei wir bedenken, daß i durch einen anderen Querschnitt q fließt und daher = kq ist; die Gl. heißt deßhalb kq = C. Setzen wir in den Werth für i diesen Werth für C ein, so entsteht i = kq (dy / dx).

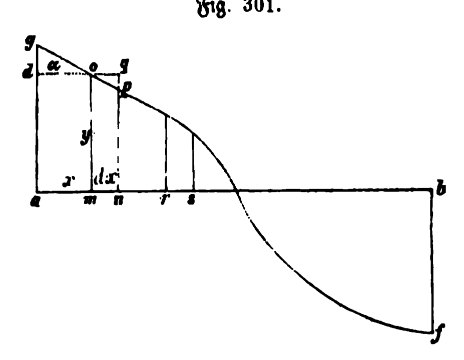


Fig. 301.

Fassen wir nun zwei andere eben so nahe bei einander stehende Querschnitte r und s des Leiters ins Auge, so ergibt sich für diese i' = kq (dy' / dx), weil dx, die Entf. der Querschnitte, q der Querschnitt selbst und k die durch die Einheit des Querschnittes fließende El. dieselben bleiben. Nun soll aber durch alle Querschnitte gleich viel El. fließen, i soll = i' sein, also muß auch dy / dx = dy' / dx sein, die trigonometrische Tangente des Neigungswinkels der einzelnen Curvenelemente muß dieselbe Größe beibehalten. Dies ist nur der Fall in der geraden Linie. Die Gefällcurve ist eine gerade Linie. Sei der Neigungswinkel derselben gegen ab gleich α, so ist tang α = gd / od = (e − y) / x. Hieraus y = e − x tang α. Wenn hier statt x die ganze Länge l des Leiters gesetzt wird, dann ist y die am Endpunkte b dieser Länge vorhandene Dichte = − e; Einsetzung in die letzte Gl. ergibt − e = e − l tang α oder tang α = 2e / l. Substituiren wir diesen Werth für dy / dx in den obigen (fett gedruckten) Werth für i, so ist i = kq . 2e / l = 2e / (l / kq). Der Divisor (l / kq) bezieht sich auf den Stromkreis; er gibt an, daß die Stromstärke in umgekehrtem Verhältnisse steht zur Länge des Stromkreises und in geradem Verhältnisse zum Querschnitte und zur Größe k. Dieser Einfluß des Stromkreises auf die Stromstärke kann kein verstärkender sein, weil der Stromkreis ja den Strom nur leitet und nicht erzeugt; sondern dieser Einfluß muß ein schwächender sein und zwar einfach dadurch, daß der Strom einen Theil seiner Kraft verbraucht, um sich seinen Weg im Stromkreise zu bahnen. Dieser schwächende Einfluß heißt der Widerstand des Stromkreises; bezeichnen wir denselben mit W, so ist i = 2e / W, womit der erste Satz bewiesen ist. Ist in der Formel für diesen Widerstand W = l / kq sowohl l als auch q = 1, so hängt der bleibende Ausdruck 1 / k nur noch von der Stoffeigenthümlichkeit ab; er ist der specifische Leitungswiderstand eines Stoffes, wie auch daraus hervorgeht, daß k die Menge der durch die Querschnittseinheit fließenden El. bedeutet, und daß der specifische Leitungswiderstand mit dieser Menge in reciprokem Verhältnisse stehen muß. Bezeichnen wir diesen specifischen Leitungswiderstand mit r und setzen in den Ausdruck für W statt k seinen Werth 1 / r, so ist W = lr / q, womit der zweite Satz bewiesen ist.

Der Widerstand W des Stromkreises besteht aber bei einer galvanischen Kette aus 2 Theilen, dem Widerstande im Schließungsbogen und dem Widerstande in der Kette selbst, da ja in dieser der Strom seinen Weg durch die Flüssigkeit zu nehmen hat. Ist der Schließungsbogen ein gleichmäßiger Draht, so ist sein Widerstand = lr / q; wenn nun der Widerstand der Kette = w ist, so beträgt der Gesammtwiderstand w + lr / q und der mathematische Ausdruck des Ohm'schen Gesetzes ist demnach für eine galvanische Kette i = e / (w + lr / q). Häufig sucht man den Widerstand der Kette ebenfalls in der zweiten Form darzustellen; man denkt sich einen Draht vom Querschnitte q (gewöhnlich 1^{qmm}) und dem spec. Leitungswiderstande r (gewöhnlich = 1) und von solcher Länge, daß sein Widerstand dem der Kette gleich ist; diese Drahtlänge, welche denselben Widerstand wie ein anderer Leiter darbietet, nennt man die reducirte Länge des Leiters. Hat man den Widerstand der Kette in dieser Weise reducirt und bezeichnet l die Summe der Länge des Schließungsbogens und der reducirten Länge, so ist einfach i = e / (lr / q). Ebenso gilt diese Form, wenn der Widerstand der Kette gegen den des Bogens verschwindet, wie es z. B. in der Thermokette der Fall ist. Der Factor 2 im Zähler kann wegbleiben, wenn wir feststellen,

daß e die von der ganzen Kette gelieferte El. bedeuten soll, welche offenbar das Maß der elektromotorischen Kraft der Kette ist.

501 **Nachweis des Ohm'schen Gesetzes.** Man kann hierbei einige Apparate benutzen, mittels deren man Widerstände in eine Leitung einschalten kann. Solche Apparate sind: 1. Der Rheostat (Fig. 302) von Jacobi (1841) und Wheatstone (1843), Auf einer dreh-

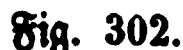
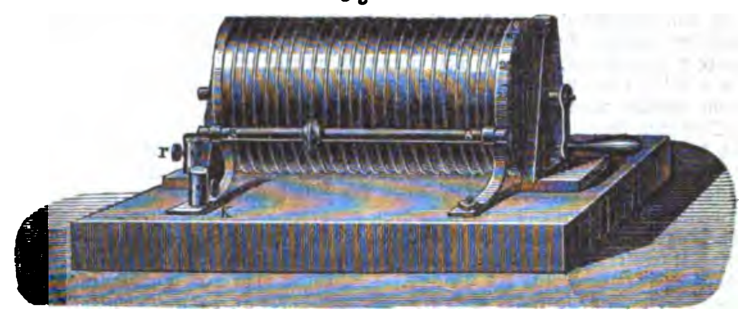


Fig. 302.



baren Walze von Holz, Serpentin oder Marmor liegt in schwach eingeschnittenen Schraubenwindungen ein Neusilberdraht, dessen eines Ende isolirt an der Walze befestigt ist, während das andere zu der einen Klemme r geht. Neben der Walze liegt horizontal ein Messingstab ss, auf dem lose eine Rolle sitzt, die mit ihrem gekehlten Rande in eine Drahtwindung greift und durch die Drehung der Walze sich auf dem Stabe hin- und herschraubt. Der Strom geht vom ersten Poldrahte über die genannte Klemme durch soviele Drahtwindungen, als bis zur Rolle vorhanden sind, und geht durch die Rolle und das Stäbchen zur zweiten Klemme k und zum zweiten Poldrahte. Die Zahl der eingeschalteten Windungen kann an einer Theilung des Stäbchens, und Bruchtheile einer Windung können an einer Kreistheilung der einen Stirnfläche der Walze abgelesen werden. Mehr geeignet für genaue Messungen ist Poggendorffs (1841) Rheochord: Die Klemmen befinden sich an 2 neben einander liegenden kupfernen Lagern; von diesen gehen Platindrähte aus durch ein verschiebbares mit Quecks. gefülltes Kästchen zu 2 Seidenfäden, die über Rollen geführt durch angehängte Gewichte die Platindrähte spannen. Unter den Drähten befindet sich ein in mm getheiltes Lineal, an dem man mittels eines am Quecksilberkästchen befestigten Nonius genaue Ablesungen machen kann. Der Strom geht von der einen Klemme zu dem einen Platindrahte und durch das Quecksilberkästchen zu dem anderen Platindrahte auf die andere Klemme. Kann mann mittels dieses Apparates nur kleinere Widerstände einschalten, so erlaubt Eisenlohrs Widerstandsäule Einschaltungen bis zu 12000 Windungen des Wheatstone'schen Rheostatendrahtes. Auf einer aufrechten Holzsäule befinden sich in immer zunehmenden Entf. von einander, parallel zu einander befestigt, mehrere Messingringe, die durch kleine drehbare Messingbrücken leitend mit einander verbunden werden können. Sind alle die Brücken geschlossen, so geht der Strom einfach durch alle Brücken und Messingringe von der oberen Klemme zur unteren, also durch eine kurze Leitung. Sind aber alle Brücken geöffnet, so muß der Strom durch einen feinen Argentandraht von 0,01″ Dicke gehen, der in immer wachsenden Längen in die Vertiefung zwischen den Messingringen eingewunden ist. Durch Schließen einer oder mehrerer Brücken kann man Theile des Drahtes ausschalten.

Ohm selbst führte den Nachweis seines Gesetzes an einer Thermokette, deren Enden in schmelzendes Eis und siedendes Wasser getaucht waren, eine Methode, welche eine directe Bestätigung der einzelnen Gesetzestheile ermöglicht. Schaltet man in den Schließungsbogen einer solchen Kette eine gewisse Anzahl von Windungen des Rheostaten und eine Tangentenbussole ein, und macht man dann den Draht 2, 3, 4 . . . mal länger, so ergibt sich, daß die Tangente des Ablenkungswinkels 2, 3, 4 . . mal kleiner wird, womit der Einfluß der Länge bewiesen ist. Schaltet man in jedem einzelnen Falle einen Draht vom doppelten Querschnitte und derselben Länge ein, so wird die Tangente des Ablenkungswinkels 2 mal größer, womit die Wirkung des Querschnittes dargethan ist. Je dicker also ein Draht ist, desto geringer ist sein Leitungswiderstand, und zwar wird der Widerstand 4, 9, 16 . . . mal kleiner, wenn die Dicke 2, 3, 4 . . . mal größer wird; wenn dagegen die Länge 2, 3, 4 . . . mal größer wird, so wird der Widerstand 2, 3, 4 . . . mal stärker, also ein ganz verschiedenes Verhalten der Länge und der Dicke. Der Leitungswiderstand der Erde als eines unendlich dicken Drahtes muß hiernach = Null sein. Eine sehr verdienstvolle Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes für die galvanische Kette lieferte Fechner (1831), die um so verdienstvoller

ist, als er weder eine constante Kette, noch eine Tangentenbussole benutzen konnte. Wollen wir dieselbe anwenden, so können wir die allgemeinere Geltung des Gesetzes folgendermaßen nachweisen: Man bestimmt zuerst die Stromstärke in chemischem Maße nach der Formel $i = A \tang \alpha$; da dieses nun bekannte i, wenn noch kein Draht eingeschaltet ist, $= e / w$, so kann man hieraus w durch e ausdrücken. Nun schaltet man zuerst einen Draht von der Länge l, dem Querschnitte q und dem Leitungswiderstande r ein, so findet eine andere Ablenkung in der Bussole statt, mittels welcher man die Stromintensität findet $i' = A \tang \beta$. Da dieses nun bekannte $i' = e / (w + rl / q)$, so kann man wieder w durch e ausdrücken. Wird nun ein anderer Draht von der Länge l', dem Querschnitte q' und dem Leitungswiderstande r eingeschaltet, so kann man abermals mittels der 2 Gl. $i'' = A \tang \gamma$ und $i'' = e / (w + rl' / q')$ den Kettenwiderstand w durch e ausdrücken. Man findet dann, wieviel verschiedene Versuche man auch anstellt, für w immer denselben Werth, woraus hervorgeht, daß im Ohm'schen Gesetze der Einfluß der Länge und der Querschnittes richtig aufgefaßt ist. Um auch den Einfluß der elektromotorischen Kraft und des Kettenwiderstandes zu erkennen, verbindet man n Bunsen'sche Elemente mit einander und schaltet die Tangentenbussole mit ihren dicken, kurzen Enddrähten direct ein. Die elektromotorische Kraft ist jetzt ne, der Kettenwiderstand aber ebenfalls n mal so groß geworden $= nw$, während der Widerstand des Schließungsbogens gegen nw verschwindet. Es ist daher jetzt $i = ne / nw = e / w$, gleich der Intensität einer einzigen Kette. Diese Folgerung bewährt die Tangentenbussole und damit auch die übrigen Theile des Gesetzes. — Schaltet man noch Drähte, zuerst l, dann $l + l' + l''$ .... ein, so findet man $i' = ne / (nw + rl / q)$, dann $i'' = ne / (nw + rl / q + rl' / q'$ u. s. w.) immer in Uebereinstimmung mit der Angabe der Tangentenbussole, eine wiederholte Bestätigung aller Theile des Gesetzes.

502 **Zwölf Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze.** 1. Die Intensität des galvanischen Stromes ist in allen Stellen seiner Leitung dieselbe.

Diese Folgerung liegt in dem Beweise des Ohm'schen Gesetzes; es wurde dort gezeigt, daß die Intensitätscurve eine gerade Linie, daß das Gefälle an allen Stellen der Leitung dasselbe ist. Nachgewiesen wurde der Satz schon von Barlow (1825) dadurch, daß eine Magnetnadel an allen Stellen der Leitung dieselbe Ablenkung erfuhr. Fechner (1831) zeigt, daß selbst in eingeschalteten flüssigen Säulen die Stromstärke dieselbe ist.

2. Die Menge der freien Elektricität auf dem Leiter nimmt von den beiden Polen nach der Mitte zu stetig ab und ist in der Mitte gleich Null. Wird der eine Pol ableitend berührt, so erhält die freie Elektricität des anderen Poles die doppelte Dichte, und diese Elektricität geht dann in stetiger Abnahme bis zu dem ersten Pole. Wird irgend eine Stelle des Leiters ableitend berührt, so wird die Dichte dieser Stelle gleich Null, zu beiden Seiten in gleichen Abständen sind gleiche, aber entgegengesetzte Dichten, und am gleichnamigen Pole wird die Elektricität um die Dichte der berührten Stelle vermindert, am ungleichnamigen Pole um denselben Betrag vermehrt.

Alle diese Sätze folgen daraus, daß die Gefällcurve (Fig. 301) eine Gerade ist, welche an beiden Enden um $+ e$ und $- e$ von der Mittellinie entfernt ist; die einzelnen Ordinaten, welche die freie El. darstellen, nehmen von $+ e$ und $- e$ an gleichmäßig ab, sind in der Mitte gleich Null und zu beiden Seiten, gleichweit von der Mitte entfernt, gleich groß, aber entgegengesetzt. Das Gefälle bleibt nun dasselbe, wenn auch eine ableitende Berührung eintritt, folglich bleiben auch die el. Differenzen dieselben. Die Differenz der Pole war vor der Berührung $e - (- e) = 2e$, also ist sie nach der Berührung auch noch 2e. Ist demnach die Dichte an einem Pole 0, so ist sie am anderen 2e, und nimmt von da bis zu 0 am anderen Pole ab. Wird eine andere Stelle ableitend berührt, z. B. in ¼ der Länge des Leiters, so wird deren Dichte Null, zu beiden Seiten dieses Punktes nimmt sie in entgegengesetzter Art zu, ist am nächsten Pole $= \frac{1}{2} e$, daher am entfernten $\frac{3}{2} e$. Kohlrausch hat (1849) diese Sätze bestätigt durch Versuche mit seinem genauen Condensator und seiner empfindlichen Drehwage.

3. Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr kleinem Widerstande läßt sich die Stromstärke durch Vermehrung der Elemente nicht vergrößern.

Der Widerstand des Schließungsbogens, der sogenannte äußere Widerstand sei mit w', der Widerstand der Kette, der innere oder wesentliche Widerstand mit w bezeichnet, so ist Ohms Gesetz $i = e / (w + w')$, woraus, da w' gegen w verschwindet, $i = e / w$. Werden nun statt eines Elementes n angewandt, so wird die elektromotorische Kraft $= ne$, der wesentliche Widerstand $= nw$, während w' bleibt; also ist $i' = ne / (nw + w')$. Da nun w' sehr klein sein soll, so verschwindet es gegen nw, daher ist $i' = ne / nw = e / w$, also $i = i'$. Die Stromintensität nimmt in diesem Falle nicht zu, wenn man statt einer Kette eine Batterie nimmt. Der Nachweis ist sehr leicht mit der Bussole zu führen.

4. Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr kleinem Widerstande wächst die Stromstärke mit der Vergrößerung der elektromotorischen Platten.

An sich ist die elektromotorische Kraft nach den galvanischen Grundversuchen unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen. Verbindet man also sämmtliche Zinkplatten einer Bunsen'schen Kette mit einander und ebenso sämmtliche Kohlenplatten, so bleibt e dasselbe, aber w wird n mal kleiner, weil der Querschnitt der durchströmten Flüssigkeit n mal größer wird; folglich ist jetzt $i' = e / (w / n + w')$ und, wenn w' verschwindend klein ist, $i' = e / (w / n) = en / w$. Da nun in diesem Falle $i = e / w$, so ist $i' = ni$, d. h. die Stromstärke wird durch nfache Vergrößerung der Platten n mal größer, wenn der äußere Widerstand verschwindet. Bei der magnetisirenden Wirkung des Galvanismus wird ein kurzer, dicker Schließungsdraht benutzt; folglich wendet man hier eine Batterie mit großen, aber wenigen Elementen an.

5. Durch Vergrößerung der Platten kann die Stromintensität jedoch nicht bis ins Unendliche gesteigert werden.

Denn der Zähler des Ausdruckes $i' = e / (w / n + w')$ bleibt bei der Vergrößerung der Platten ungeändert; in dem Nenner aber wird der erste Summand w / n immer kleiner, je größer n wird und verschwindet endlich gegen w'; die größte Intensität also, die durch Vergrößerung der Platten möglich ist, ist $= e / w'$.

6. Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr großem Widerstande wächst die Stromstärke mit Vermehrung der Elemente.

Für ein Element gilt die Formel $i = e / (w + w')$, für n Elemente $i' = ne / (nw + w')$. Ist nun nw gegen w' sehr klein, so ist $i = e / w'$ und $i' = ne / w'$, folglich ist $i' = ni$. Ist also der wesentliche Widerstand verschwindend gegen den äußeren, so wächst die Stromintensität mit der Zahl der Elemente.

7. Durch Vermehrung der Elemente kann die Stromintensität jedoch nicht ins Unendliche gesteigert werden.

Denn die Formel $i' = ne / (nw + w')$ läßt sich auch so schreiben: $i' = e / (w + w' / n)$. Wenn in diesem Ausdrucke n größer wird, so bleibt der Zähler unverändert, und in dem Nenner wird der zweite Summand w' / n immer kleiner und verschwindet endlich gegen w; folglich ist die höchste durch die Vermehrung der Elemente zu erreichende Intensität $= e : w$.

8. Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr großem Widerstande wächst die Stromstärke nicht durch Vergrößerung der Platten.

Wieder ist für ein Element $i = e / w'$. Werden nun n Zinkplatten mit einander verbunden und ebenso n Kohlenplatten, so wird e nicht größer, wohl aber wird w jetzt n mal kleiner; folglich $i' = e / (w / n + w') = ne / (w + nw')$. Da nun w gegen nw' noch eher verschwindet, so ist $i' = ne / nw' = e / w'$; folglich ist $i' = i$. Die Vergrößerung der Platten hat also bei großen äußeren Widerständen, wie bei chemischen und physiologischen Versuchen, keinen Einfluß auf die Stromintensität, dagegen wirkt die Zahl der Elemente verstärkend auf dieselbe ein. Man nimmt also in solchen Fällen viele, aber kleine Elemente.

9. Das Maximum der Stromstärke wird erreicht, wenn der innere Widerstand dem äußeren gleich ist, wenn der wesentliche Widerstand gleich dem des Schließungsbogens ist.

Beweis. Angenommen, es würden von einer Batterie von n Elementen je x Platten zu einer verbunden, so sind nur noch n / x Elemente vorhanden, und die elektromotorische Kraft ist daher $(n / x) e$. Der wesentliche Widerstand eines Elementes, der vorher w war, ist jetzt w / x, daher ist er in allen Elementen $= nw / x^2$; ist der äußere Widerstand w', so ist demnach $i = (n / x) e / [(nw / x^2) + w'] = ne / [(nw / x) + w'x]$ und $i^2 = n^2 e^2 / [(nw / x) + w'x]^2$. Dieser Bruch wird ein Maximum, wenn der Nenner ein Minimum wird; dem Nenner aber kann man die Form geben: $4 nww' + [(nw / x) - w'x]^2$, aus welcher Form ersichtlich ist, daß ein Minimum eintritt, wenn $(nw / x) - wx = 0$, d. h. wenn $nw / x^2 = w'$.

10. Das Maximum der Stromstärke ist $e/_2 \sqrt{(n / ww')}$, und die Zahl der in 1 zu vereinigenden Elemente ist $x = \sqrt{(nw / w')}$.

Beweis. In dem eben betrachteten Nenner von i^2 ist für den Fall des Maximums der 2te Summand $= 0$, also $i^2 = n^2 e^2 / 4nww'$, woraus $i = ne / 2 \sqrt{(nww')} = e/_2 \sqrt{(n^2 / nww')}$. Ebenso ergibt die Bedingung $nw / x^2 = w'$ des Maximums für x den Werth $\sqrt{(nw / w')}$.

11. Ist ein neu eingeschalteter Widerstand im Verhältnisse zum ursprünglichen groß, so sinkt die Stromstärke bedeutend, im entgegengesetzten Falle aber nur wenig.

Die Intensität $i = e / w$ wird durch den neuen Widerstand w' nun $i' = e / (w + w')$,

so daß $i : i' = (w + w') : w = [1 + (w' / w)] : 1$; dies letztere Verhältniß ist aber um so größer, je größer w' / w.

12. Ist ein Multiplicator in einem Stromkreis von geringem Widerstande eingeschaltet, so muß er aus einer beschränkten Zahl von Windungen dicken Kupferdrahtes bestehen; ist jedoch außer dem Multiplicator ein großer Widerstand vorhanden, so muß er aus vielen Windungen feinen Drahtes bestehen.

Beweis. Die drehende Einwirkung einer Stromwindung wächst mit der Stromstärke, also mit $e / (w + w')$, worin w den Widerstand in einem um die Nadel geschobenen Kupferringe und w' den übrigen Widerstand bedeutet. Wird nun dieser Ring in einen Draht von n facher Länge und daher n mal kleinerem Querschnitte verwandelt, so wird aus diesen Gründen die Stromstärke $i = e / (wn^2 + w')$. Dieser Draht bildet jedoch n Windungen um die Nadel; daher ist das Drehungsmoment proportional zu $ne / (wn^2 + w')$ oder zu $e / [wn + (w' / n)]$. Das Quadrat dieses Ausdrucks ist $e^2 / [wn + (w' / n)]^2$. Den Nenner desselben kann man auf die Form bringen: $4ww' + [wn - (w' / n)]^2$. Dieser Nenner aber wird ein Minimum, wenn $wn = w' / n$, oder wenn $w' = wn^2$. Wenn jedoch der Nenner ein Minimum wird, so wird der Werth des Bruches, die drehende Wirkung des Stromes, ein Maximum. Dieser Fall tritt also ein, wenn wn^2, der Widerstand des Multiplicators, gleich dem übrigen Widerstande ist. Ist also wie in einer Thermosäule der Widerstand im Stromkreise klein, so muß auch der des Multiplicators gering sein; ist aber, wie bei physiologischen Versuchen, der Widerstand im Stromkreise groß, so muß auch der des Multiplicators groß sein.

503 **Stromverzweigungen** (Ohm 1827, Kirchhoff 1845). Man kennt die elektromotorische Kraft e einer Kette, sowie die Längen, die Querschnitte und die specifischen Leitungswiderstände von Drähten, die sich von dem Schließungsdrahte abzweigen und wider mit demselben vereinigen; man soll die Stromstärke in den Zweigen wie in dem Hauptdrahte bestimmen. Der einfachste Fall besteht darin, daß mehrere Drähte von einem Punkte des Hauptdrahtes ausgehen und sich wieder in einem Punkte vereinigen. Für diesen Fall ergibt sich das Gesetz: der Stromantheil, der einen Zweig durchfließt, steht im geraden Verhältnisse zu dem Producte der reducirten Längen der gleichzeitig mit ihm durchströmten Leiter, oder die Stromstärken in 2 Zweigdrähten verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände derselben.

Beweis. Es mögen die auf die Einheit des Querschnittes und des Leitungswiderstandes reducirten Längen der Zweigdrähte $= l_1$, l_2 und l_3 sein, so kann man sich statt derselben auch Drähte von der Länge 1 denken, die denselben Widerstand leisten; dies ist aber nur möglich, wenn dieselben die Querschnitte $(1 / l_1)$, $(1 / l_2)$ und $(1 / l_3)$ haben. Da nun diese 3 Drähte dieselbe Wirkung haben, wie ein Draht von der Summe dieser 3 Querschnitte, so müßte dieser Draht den Querschnitt haben $(1 / l_1) + (1 / l_2) + (1 / l_3) = (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) / l_1 l_2 l_3$. Würde man diesen Draht an die Stelle jener 3 setzen, so würde seine Intensität $= i$, gleich der Intensität im Hauptdrahte sein, und die Intensitäten i_1, i_2 und i_3 in den Zweigdrähten müßten sich demnach zu i wie die Querschnitte verhalten. Hieraus ergeben sich die Intensitäten in den drei Zweigen $i_1 = i \, . \, l_1 l_2 l_3 / l_1 (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) = i \, . \, l_2 l_3 / (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$, ebenso $i_2 = i \, . \, l_1 l_3 / (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$ und $i_3 = i \, . \, l_1 l_2 / (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$, worin das allgemeine Gesetz liegt. Sind nur 2 Zweigdrähte von den Widerständen l_1 und l_2 vorhanden, so ist $i_1 = i \, . \, l_2 / l_1 l_2 = i / l_1$ und $i_2 = i \, . \, l_1 / l_1 l_2 = i / l_2$, woraus $i_1 : i_2 = i / l_1 : i / l_2$ oder $i_1 : i_2 = l_2 : l_1$, womit der specielle Fall des Gesetzes bewiesen ist. Um die Intensität im Hauptdrahte zu finden, muß zuerst der Widerstand in den Zweigdrähten bestimmt werden. Da dieser Widerstand gerade so groß ist, wie der des gedachten Drahtes von dem spec. Widerstande 1 und dem Querschnitte $(l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) / l_1 l_2 l_3$, so ist dieser Widerstand $= l_1 l_2 l_3 / (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$. Ist nun der Widerstand im Hauptdrahte und der Kette $= w$, so ist $i = e / [w + l_1 l_2 l_3 / (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)] = e (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) / [w (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) + l_1 l_2 l_3]$. Durch Substitution dieses Werthes in die 3 Zweigintensitäten kann man auch diese durch die gegebenen Größen ausdrücken.

Die zahlreichen Aufgaben, welche die Stromverzweigung darbietet, lassen sich auch mittels zweier von Kirchhoff aufgestellten Grundgesetze lösen; 1. Die Summe der Stromstärken in allen denjenigen Drähten, die in einem Punkte zusammenstoßen, ist gleich Null, oder die Stromstärke im Hauptdrahte ist gleich der Summe der Stromstärken in den Zweigdrähten. 2. Die Summe der Producte der Stromstärken und der Widerstände aller eine geschlossene Figur bildenden Drähte ist

gleich der Summe aller in dem betreffenden Stromkreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte.

Beweis. Der erste Satz ist eine unmittelbare Folge davon, daß dem Verzweigungspunkte der Drähte eben so viel El. zugeführt als entzogen wird. Für den Beweis des zweiten Satzes mögen z. B. drei Stücke von den Längen l_1, l_2, l_3 eine geschlossene Figur bilden. Die el. Spannung an den Anfangspunkten dieser Stücke sei m_1, m_2, m_3, das Gefälle in denselben n_1, n_2, n_3. An dem Berührungspunkte des Drahtes 1 mit 2 befinde sich die elektromot. Kraft K_1, von 2 mit 3 K_2, von 3 mit 1 K_3, so ist $m_1 - n_1 l_1 + K_1 = m_2$, $m_2 - n_2 l_2 + K_2 = m_3$, $m_3 - n_3 l_3 + K_3 = m_1$. Hieraus folgt durch Addition $n_1 l_1 + n_2 l_2 + n_3 l_3 = K_1 + K_2 + K_3$. Nach 500 (fettgedruckte Formel) ist $n = i / kq$, und $l / kq = w$, also $i_1 w_1 + i_2 w_2 + i_3 w_3 = K_1 + K_2 + K_3$, w. z. b. w. — Eine Anwendung finden diese Sätze auf die Wheatstone'sche Schleife: In eine Drahtleitung ist eine Raute mit ihren spitzen Enden eingeschaltet, während in der Mitte ein Galvanometer steht, dessen Draht zu den stumpfen Enden geht. Werden die Widerstände w_1, w_2, w_3, w_4 in den Seiten der Raute so variirt, daß durch das Galvanometer kein Strom geht, so ergeben die beiden Sätze $w_1 : w_2 = w_3 : w_4$.

504 **Der specifische Leitungswiderstand.** Um die Leitungswiderstände verschiedener Körper messen, vergleichen zu können, bedarf es einer Widerstandseinheit. Leider sind verschiedene Widerstandseinheiten aufgestellt. Die Widerstandseinheiten im absoluten Maßsystem werden wir bei der Betrachtung dieses Systems kennen lernen. Jacobi (1848) nahm denjenigen Widerstand als Einheit, den ein Kupferdraht von 1^m Länge und 1^{mm} Durchmesser dem elektrischen Strome entgegensetzt. Siemens (1849) schlug als Widerstandseinheit den Widerstand eines Quecksilberprismas von 1^m Länge und 1^{qmm} Querschnitt bei 0° C. vor. Nach Langsdorff (1853) ist es am leichtesten, Drähte von chemisch reinem Silber immer von gleichem Widerstande zu erhalten. Da außerdem Silber den geringsten Leitungswiderstand hat, so ist auch die Silbereinheit häufig angewendet worden. Der als Widerstandseinheit gewählte Draht wird Normaldraht genannt; wird ein anderer Widerstand in Normaldrahtlänge verwandelt, d. h. wird angegeben, welche Länge Normaldraht jenem Widerstande gleich sei, so heißt diese Länge die reducirte Länge. Die Methoden zur Bestimmung des Widerstandes fester Körper sind: die Substitutionsmethode, die Compensationsmethode und die Wheatstone'sche Schleife.

Die Substitutionsmethode besteht darin, daß man zuerst den zu messenden Widerstand zusammen mit einer Bussole in den Stromkreis einer Kette einschaltet, die Ablenkung beobachtet, und dann an der Stelle des Widerstandes den Rheostaten einschaltet und so lange dreht, bis die Ablenkung wieder dieselbe ist. Man erfährt dann, wie vielen Windungen des Rheostaten der unbekannte Widerstand gleich ist, und da man im Voraus bestimmt hat, wie viel Normaldraht einer Windung des Rheostaten entspricht, so kann man auch den Widerstand in Normaldraht ausdrücken. Die Compensationsmethode besteht darin, daß man mit Hilfe einer Sinusbussole die Stromstärken vergleicht, welche eine und dieselbe Batterie in zwei Stromkreisen erzeugt, von denen der eine einen bekannten Widerstand hat, der andere aber den unbekannten Widerstand enthält. Gesetzt bei Einschaltung des Rheostaten sei die Ablenkung α und bei Einschaltung des Widerstandes α', so verhalten sich die Stromstärken $i : i' = \sin\alpha : \sin\alpha'$. Es sei nun der Widerstand des Rheostaten $= r$, der unbekannte Widerstand $= x$, der der Kette w, so ist auch $i : i' = [e / (w + r)] : [e / (w + x)] = (w + x) : (w + r)$. Durch Verbindung der 2 Gl. erfolgt $\sin\alpha : \sin\alpha' = (w + x) : (w + r)$, woraus $x = (w + r) \sin\alpha / \sin\alpha' - w$. — Auch bei Anwendung der Wheatstone'schen Schleife wird ein Rheostat eingeschaltet, und zwar in die eine Rautenseite, während in die andere der unbekannte Widerstand eingeschaltet wird. Stand anfänglich das Galvanometer auf Null, so dreht man nach den Einschaltungen so lange am Rheostat, bis abermals die Nullstellung erreicht ist; dann ist der unbekannte Widerstand gleich dem des Rheostaten. Doch ist die Methode nur für kleine Widerstände anwendbar. Um sie für größere anzuwenden, schaltet man in die eine Rautenseite den unbekannten Widerstand, in die anderen dagegen veränderliche ablesbare Widerstände ein, wie das Rheochord oder die Widerstandsäule und verändert dieselben so lange, bis die Ablenkung $= 0$ ist. Dann ist nach der Theorie der Schleife (503.) der unbekannte Widerstand gleich dem Product der 2 in den anderen stumpfen Winkel eingeschalteten Widerstände dividirt durch den Widerstand in demselben stumpfen Winkel, in dem der unbekannte Widerstand sitzt. — Nach solchen Methoden fand man, wenn der Leitungswiderstand des Kupfers = 1 gesetzt wird, den des Silbers = 0,73, des Goldes = 0,97, des Messings = 3,57, des Platins = 4,54, des Eisens

= 5,88, des Neusilbers = 15,47, des Quecksilbers = 38,46. Um den Leitungswiderstand einer Flüssigkeit zu bestimmen, schließt man dieselbe in eine Meßröhre ein, zwischen den mit Platin bekleideten Boden und einen ebenfalls mit Platin bekleideten verschiebbaren Kolben, dessen Verschiebung genau gemessen werden kann. Diese Meßröhre wird mit der Widerstandsäule, dem Rheostat und einem Galvanometer zusammen in einen Stromkreis eingeschaltet. Dann wird der Stempel etwas zurückgezogen und der leer gewordene Theil mit Flüssigkeit erfüllt; das Galvanometer geht hierdurch etwas zurück, so viel als der Leitungswiderstand der zugefüllten Flüssigkeit ausmacht. Man verringert nun den Widerstand mittels der Widerstandsäule und am Rheostat so lange, bis der Galvanometerstand wieder hergestellt ist. Die Länge des ausgeschalteten Drahtes gibt den Widerstand an. So fand man den Widerstand von Schwefelsäure von 1,1 bis 1,4 sp. G. = 938500 bis 1023400, von gesättigter Kochsalzlösung = 3173000, von gesättigter Kupfervitriollösung = 18450000, von käuflicher Salpetersäure = 1606000, wobei die Silbereinheit angenommen ist. Man sieht hieraus, wie groß der Widerstand der Flüssigkeiten ist im Verhältnisse zu dem der festen Körper; der Widerstand des menschlichen Körpers = 90000 Jacobi'schen Einheiten, vorausgesetzt noch, daß man die Hände in gesäuertes Wasser taucht.

Bei den festen Körpern gibt man gewöhnlich die **Leitungsfähigkeit** an, welche dem Leitungswiderstande reciprok ist; man multiplicirt indeß, um nicht zu kleine Zahlen zu erhalten, den reciproken Werth mit 100, setzt also die Leitungsfähigkeit des Silbers = 100. Dann ist nach Matthiessen (1857) die von Kupfer = 77, Gold 56, Natrium 37, Aluminium 34, Zink 27, Eisen 14, Zinn 11, Platin 11, Blei 8, Neusilber 8, Wismuth 1, Graphit 0,07, Gaskohle 0,04. Die Tafeln der verschiedenen Forscher sind ungleich, weil die chemische Reinheit einen großen Einfluß hat; außerdem treten Veränderungen durch Spannung, Härte, Dichtigkeit und Temp. ein. Die Spannung scheint die Leitung zu vermindern, größere Dichtigkeit dieselbe bald zu vermindern, bald zu vermehren; die Leitung des Kupfers wird durch Härten und Anlassen vermindert, die anderer Metalle durch Anlassung vermehrt. Die Leitungsfähigkeit nimmt bei steigender Temp. ab; so steigt der Leitungswiderstand von Eisendraht von 690 bei 21° bis 4880 bei der Weißgluth. Wiedemann fand, daß der Leitungswiderstand von Kupfervitriollösung bei einer Temperaturerhöhung von 55° um die Hälfte abnimmt, also ein umgekehrtes Verhalten. Es wird angegeben, daß bei unzersetzbaren Leitern die Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur ab-, bei zersetzbaren aber zunimmt. Besonders gering ist die Leitungsfähigkeit des Wassers; nach Pouillet soll sie nur 0,0025 von der der concentrirten Kupfervitriollösung sein.

505 **Die Constanten eines galvanischen Elementes.** Zur Berechnung der Stromstärke bedarf man außer dem Leitungswiderstande nach dem Ohm'schen Gesetze noch der elektromotorischen Kraft und des wesentlichen Widerstandes; man nennt diese Größen gegenüber dem veränderlichen Widerstande des Schließungsbogens die Constanten der Kette. Zur Bestimmung derselben gibt es mehrere Methoden: 1. Die Ohm'sche Methode (1830), 2. die Poggendorff'sche Compensationsmethode (1845), 3. die Vergleichungsmethode, 4. die Siemens'sche directe Widerstandsmessung (1874).

Nach Ohm schaltet man eine Kette mit einer Bussole und einem Rheochord ein, in welchem der Schlitten auf 0 steht; kennt man die Reductionsconstante, so findet man aus der Ablenkung die Stromstärke i in chemischen Maße; da diese nun auch $i = e / w$, so ist $e = iw$. Nun schaltet man einen bestimmten Widerstand w' des Rheochord ein, bestimmt abermals aus der entstehenden Ablenkung die Stromstärke $i' = e / (w + w')$, so hat man $e = i' (w + w')$. Aus den 2 Gl. für e ergibt sich der wesentliche Widerstand $w = i'w' / (i - i')$ und die elektromotorische Kraft $e = i i'w' / (i - i')$. Diese Methode eignet sich nur für constante Ketten, da inconstante sich zwischen den zwei Versuchen ändern. Für solche, wie auch für constante Ketten ist Poggendorffs Compensationsmethode geeignet. Dieselbe benutzt eine constante Kette, deren Constanten nach Ohms Methode schon bestimmt sind, und verbindet dieselbe mit der zu untersuchenden Kette durch eine Stromverzweigung, deren Wirkung nach Ohms oder Kirchhoffs Gesetzen berechnet werden kann und so die elektromotorische Kraft und dadurch auch den Widerstand ergibt (s. Aufg. 806 und 807). — Von den zahlreichen Vergleichungsmethoden sei Fechners Methode (1830) erwähnt. Die zu vergleichenden Elemente werden zugleich hinter einander in den Stromkreis eingeschaltet, einmal so, daß die von beiden erzeugten Ströme gleich gerichtet sind, sich also summiren, dann so, daß sie entgegengesetzt gerichtet sind, sich also subtrahiren. Die Stromstärken in beiden Fällen seien i und i', die elektromotorischen Kräfte e und e', und der Widerstand des ganzen Stromkreises = w, so ist $i = (e + e') / w$, $i' = (e - e') / w$; hieraus $e = \frac{1}{2} w (i + i')$ und $e' = \frac{1}{2} w (i - i') = e (i - i') / (i + i')$.

Berechnung der Stromstärke aus den Constanten. Nach Untersuchungen von Müller ist der Widerstand eines Zink-Kohlen-Elementes je nach

dem Gehalte an Schwefelsäure = 6 bis 30 Silbereinheiten, der Widerstand des Daniell'schen Elementes 12 bis 25; ebenso ergibt sich nach Müller die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes = 520 Jacobi'sche Einheiten, wenn der Widerstand 1 Silbereinheit beträgt. Da aber der Widerstand viel größer ist und schon in dem Elemente selbst ein Widerstand von 12 bis 25 Einheiten zu überwinden ist, wozu noch der äußere, ebenfalls in Silbereinheiten auszudrückende Widerstand kommt, so ist die Leistung in Wirklichkeit viel geringer. Um den äußeren Widerstand auf Silbereinheiten zu reduciren, muß man die in 504. angegebene Leitungsfähigkeit mit 100 dividiren und dann reciprok nehmen, wodurch man den specifischen Leitungswiderstand in Silbereinheiten erhält; diesen muß man nach dem Ohm'schen Gesetze mit der Länge des betreffenden Widerstandes in Metern multipliciren und mit dem Querschnitte in Quadratmillimetern dividiren. Die so gefundenen Werthe der beiden Widerstände setzt man in die Formel des Ohm'schen Gesetzes ein, so findet man die Stromstärke. Solche Berechnungen sind in die Aufgaben aufgenommen. Die Stärke des Grove'schen und des Bunsen'schen Elementes ist nach verschiedenen Forschern 1,6 bis 1,9 des Daniell'schen.

Bemerkenswerth sind noch folgende Besonderheiten: Die höchsten elektromotorischen Kräfte, welche bis jetzt beobachtet wurden, fand Beetz an der Kette Platin-Kalium in Schwefelsäure und an der Kette Braunstein-Kaliumamalgam in übermangansaurem Kalium und Kalilauge. Die elektromotorische Kraft des Grove'schen Elementes steigt bis auf 2,5 des Daniell'schen, wenn die Schwefelsäure durch Kalilauge ersetzt wird. Das Grove'sche Element wird geschwächt auf $^3/_5$, wenn die Salpetersäure durch Chromsäure ersetzt wird, das Bunsen'sche Element dagegen nicht.

Das absolute elektromagnetische Maßsystem. Wie das chemische Maß aus der Wirkung des el. Stromes auf eine Magnetnadel abgeleitet wird, so führt man auch das absolute Maß auf die elektromagnetische Wirkung zurück, und diese absolute Maßbestimmung heißt das absolute elektromagnetische Maß. Da nämlich ein el. Strom auf eine Magnetnadel, auf einen M. wirkt und, wie wir später besprechen werden, auch eine magnetisirende Wirkung auf weiches Eisen ausübt, so hat auch der elektrische Strom ein magnetisches Feld. Wir fanden in 461., daß die Intensität des magn. Feldes eines Magnetes vom Moment M in der Entf. l ist $F = M/l^3$. Nun wollen wir auch die Intensität des von einem Kreisstrom hervorgerufenen magn. Feldes aufsuchen, und zwar für einen Punkt, der in der Achse des Kreisstromes, in der auf seiner Fläche im Centrum errichteten Senkrechten liegt. Ist die Entfernung dieses Punktes vom Centrum l, der Radius des Kreisstromes r und die Stromstärke i, so ist $F = r^2 \pi i/l^3$. 506

Fig. 303.

Beweis. Jedes unendlich kleine Stückchen δ des Kreisstromes (Fig. 303) übt auf eine Magnetnadel bei e eine magn. Wirkung aus, die offenbar in demselben Maße wächst wie δ und i, weil in diesem Maße die auf jene wirkende El. wächst; außerdem steht sie im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entf. ae, das $= l^2 + r^2$ ist; also ist die Wirkung auf die Nadel proportional zu $\delta i/(l^2 + r^2)$. Diese Kraft wirkt, weil sich der M. senkrecht zur Stromrichtung stellt, in der Richtung eg, senkrecht zu ae. Zerlegen wir jede dieser Kräfte in 2 Comp., eine ek senkrecht zur Achse und eine in die Achsenrichtung fallende eh, so heben sich die senkrechten Comp. auf, während sich alle anderen in eine Resultante von der Achsenrichtung vereinigen. Da die letzteren Comp. durch Multiplication mit $\sin \alpha = r/\sqrt{(l^2 + r^2)}$ gefunden werden, so ist jede solche Componente $= \delta i/(l^2 + r^2) \,.\, r/\sqrt{(l^2 + r^2)} = r \delta i/(l^2 + r^2)^{3/2}$. Werden alle diese Comp. addirt, so läßt sich aus der Summe der Ausdruck $ri/(l^2 + r^2)^{3/2}$ ausscheiden, und in der Klammer bleibt die Summe aller δ, welche gleich $2\pi r$ ist; also ist die Resultante auf die Magnetnadel $= 2\pi r^2 i/(l^2 + r^2)^{3/2}$; unter der Voraussetzung, daß r sehr klein gegen l ist, kann r^2 gegen l^2 vernachlässigt werden, und der Aus-

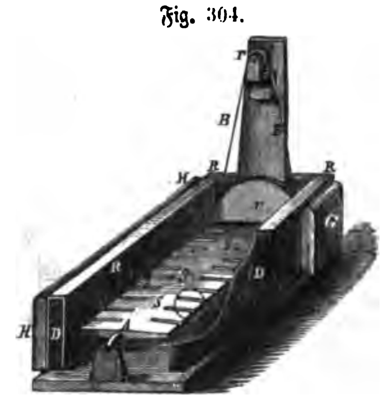
druck nimmt die Gestalt an $2\pi r^2 i/l^3$. Wollen wir statt der Wirkung auf eine Nadel nur die Wirkung auf einen Pol ins Auge fassen, so erhalten wir die Intensität des magn. Feldes $= \pi r^2 i/l^3$.

Aus der Vergleichung der zwei magnetischen Felder M/l^3 und $\pi r^2 i/l^3$ folgt: Ein Strom von der Intensität i, der die Kreisfläche πr^2 umfließt, hat dieselbe magnetische Wirkung wie ein Magnetstab, dessen Moment $M = \pi r^2 i$ ist; die Stromintensität i ist demnach gleich dem magnetischen Moment dividirt durch diese Kreisfläche; hierdurch ist es möglich, die Stromintensität durch den Magnetismus auszudrücken. Da nun der Magnetismus nach demselben Gesetze wie die El. wirkt, so ist auch das absolute Maß desselben wie das der Elektricität (469.) $= \sqrt{(l^2 f)}$ und von der Dimension $m^{1/2} l^{3/2} t^{-1}$. Das magnetische Moment M aber ist bekanntlich (460.) das Product aus dem Magnetismus und der Länge l, ist also von der Dimension $m^{1/2} l^{3/2} t^{-1} \cdot l = m^{1/2} l^{5/2} t^{-1}$. Um aus dem Moment die Stromintensität zu erhalten, muß dieselbe noch durch die Fläche, also im Allgemeinen durch l^2 dividirt werden, wodurch sich ergibt (dim i) $= m^{1/2} l^{1/2} t^{-1}$. Die Einheit der Stromstärke ist hiernach derjenige Strom, der die Flächeneinheit umfließend, dieselbe Wirkung ausübt, wie ein im Mittelpunkt des Kreises angebrachter Magnet vom Moment 1.

a. Die Stromstärke. Um der verwirrenden Vielheit der absoluten und empirischen Maße ein Ende zu machen, hat der Congreß der Elektriker zu Paris am 21. Sept. 1881 beschlossen, daß das absolute elektromagnetische Maßsystem allgemein eingeführt und durch die Krafteinheit g - cm - sec ausgedrückt werden soll. Damit jedoch die praktischen Einheiten nicht zu klein seien und mit den bisherigen übereinstimmen, soll die Masse von 10^{-11}g und die Länge von einem Erdquadrant $= 10^7$m $= 10^9$cm wie bisher zu Grunde liegen. Die Einheit der Stromstärke heißt Ampère; demnach ist 1 Ampère $= m^{1/2} l^{1/2} t^{-1} = 10^{-\frac{11}{2}} 10^{\frac{9}{2}} = 10^{-1} g^{1/2} \cdot cm^{1/2} \cdot sec^{-1}$.

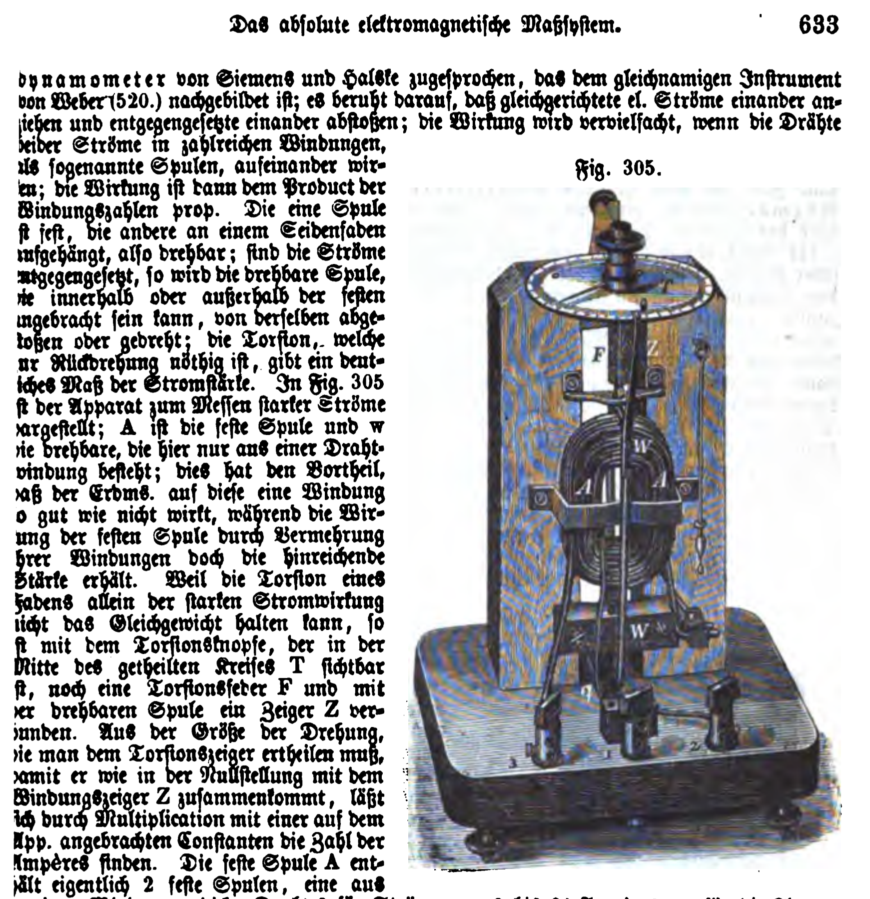
Die gewöhnlichen Galvanometer dienen zum Messen schwacher Ströme; für die starken Ströme der Elektrotechnik sind neue Instrumente construirt worden, von denen einige die Zahl der Ampères direct ablesen lassen, wie das Galvanometer von Deprez und das Ammeter von Ayrton und Perry; ersteres ist (ohne Zeiger und Skala) durch Fig. 304 in seinen wirksamen Theilen dargestellt. HHG ist ein starker Hufeisenstahlmagnet, der in der Figur bei G abgebrochen ist, um das Innere des Instrumentes sichtbar zu machen. Das Hufeisen umschließt einen hohlen Kupferrahmen RR, durch welchen der zu messende Strom geht (bei der Messung von elektromotorischen Kräften oder Klemmenspannungen geht derselbe durch zahlreiche Drahtwindungen, die in der Höhlung D liegen). Innerhalb des Kupferrahmens befindet sich eine leierförmige Eisenlamelle SS, die mit 2 Schneiden (eine bei A) auf Lagern ruht und sich um dieselben etwa 10° drehen kann. Die Einschnitte theilen die Lamelle in zahlreiche Nadeln, die durch das Hufeisen magnetisirt und vom Strom abgelenkt werden; die Ablenkung theilt sich der unteren Rolle r mit, welche durch die Schnüre B die obere kleinere Rolle und damit deren Zeiger stärker dreht. Wegen der starken Wirkung des Stromes und des Ms. ist der App. vom Erdms. unabhängig und aperiodisch, die Lamelle schwingt nicht, sondern wird nur abgelenkt; hierzu trägt auch der kupferne Rahmen bei, der durch Inductionsströme die Schw. dämpft. Durch das Gewicht g wird die Lamelle während der Ruhe in die Gleichgewichtslage zurück geführt. Wegen der kleinen Ablenkung der Lamelle ist die Ablenkung der Stromstärke proportional, wodurch die Eintheilung und Ablesung in Ampères möglich wird. — Aehnlich aber weniger zuverlässig ist das Ammeter; die größte Genauigkeit und Zuverlässigkeit wird Seitens der Elektrotechniker dem Torsionselektro-

Fig. 304.



Dynamometer von Siemens und Halske zugesprochen, das dem gleichnamigen Instrument von Weber (520.) nachgebildet ist; es beruht darauf, daß gleichgerichtete el. Ströme einander anziehen und entgegengesetzte einander abstoßen; die Wirkung wird vervielfacht, wenn die Drähte beider Ströme in zahlreichen Windungen, als sogenannte Spulen, aufeinander wirken; die Wirkung ist dann dem Product der Windungszahlen prop. Die eine Spule ist fest, die andere an einem Seidenfaden aufgehängt, also drehbar; sind die Ströme entgegengesetzt, so wird die drehbare Spule, die innerhalb oder außerhalb der festen angebracht sein kann, von derselben abgestoßen oder gedreht; die Torsion, welche zur Rückdrehung nöthig ist, gibt ein deutliches Maß der Stromstärke. In Fig. 305 ist der Apparat zum Messen starker Ströme dargestellt; A ist die feste Spule und w die drehbare, die hier nur aus einer Drahtwindung besteht; dies hat den Vortheil, daß der Erdms. auf diese eine Windung so gut wie nicht wirkt, während die Wirkung der festen Spule durch Vermehrung ihrer Windungen doch die hinreichende Stärke erhält. Weil die Torsion eines Fadens allein der starken Stromwirkung nicht das Gleichgewicht halten kann, so ist mit dem Torsionsknopfe, der in der Mitte des getheilten Kreises T sichtbar ist, noch eine Torsionsfeder F und mit der drehbaren Spule ein Zeiger Z verbunden. Aus der Größe der Drehung, die man dem Torsionszeiger ertheilen muß, damit er wie in der Nullstellung mit dem Windungszeiger Z zusammenkommt, läßt sich durch Multiplication mit einer auf dem App. angebrachten Constanten die Zahl der Ampères finden. Die feste Spule A enthält eigentlich 2 feste Spulen, eine aus wenigen Windungen dicken Drahtes für Ströme von 2 bis 20 Ampères, wofür die Klemmschrauben 1 und 3 benutzt werden, und eine aus mehr Windungen dünnen Drahtes für 20 bis 70 Ampères, wozu die Klemmen 2 und 3 dienen.

Fig. 305.



b. Die Einheit der Quantität heißt Coulomb; ein Coulomb ist die Elektricitätsmenge, die in einer Secunde ein Ampère erzeugt; sie ist, da $i = \varepsilon/t$ ist, $\varepsilon = it = m^{1/2}l^{1/2}t^{-1} \cdot t = m^{1/2}l^{1/2} = 10^{-1}g^{1/2}cm^{1/2}$.

c. Die Einheit der elektromotorischen Kraft ist das Volt. Die elektromotorische Kraft wird durch die Potentialdifferenz gemessen; das Potential ist aber die Arbeit auf die Einheit der Quantität, also $= A\varepsilon$, wenn A die Arbeit bedeutet. Nun ist die Arbeit gleich dem Product aus Kraft und Weg, also nach der Bezeichnung des absoluten Systems $A = ml t^{-2} l = ml^2t^{-2}$. Demnach ist das Volt $= ml^2t^{-2}/\varepsilon = ml^2t^{-2}/m^{1/2}l^{1/2} = m^{1/2}l^{3/2}t^{-2} = 10^{-11/2} \cdot 10^{27/2} \cdot t^{-2} = 10^8 g^{1/2}cm^{3/2}t^{-2}$. Schicken wir voraus, daß die Einheit des Widerstandes Ohm heißt, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze 1 Ampère = 1 Volt/1 Ohm; demnach kann das Volt auch definirt werden als die elektromotorische Kraft, die in einem Leiter von 1 Ohm Widerstand eine Stromstärke von 1 Ampère erzeugt. Von den gebräuchlichen Elementen kommt die elektromotorische Kraft des Daniell'schen Elementes dem Volt am nächsten; denn sie ist = 1,124 Volts; die des Bunsen'schen Elementes = 1,7 Daniell, also = 1,9108, nahezu = 2 Volts.

Näher als das Daniell'sche Element kommt dem Volt das Chlorsilberelement: auf dem Boden eines Glasgefäßes liegt ein Silbercylinder, von dem der pos. Poldraht in einer

Guttaperchahülle hinausgeht durch frisch gefälltes Chlorsilber, das auf den Cylinder [illegible] ist, und eine conc. Kochsalzlösung, die das Glas erfüllt und worin ein amalgamirter Zinkstab taucht; die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist = 1,065 Volts; auch hat es nicht den Nachtheil, daß seine Kraft während des Gebrauchs sich ändert, wie es bei Daniell durch die fortschreitende Verdünnung der Vitriollösung und deren Diffusion in die Thonzelle zum Zink der Fall ist; das **Chlorsilberelement** kann daher mit mehr Recht als **Normalelement** bezeichnet werden, wie das von Daniell. Von den Elektrotechnikern wird das Clark'sche Element als Normalelement vorgezogen, obwohl seine elektrom. Kr. = 1,442 Volts ist; es besteht aus einem 2cm weiten Glasgefäße, dessen unterster Theil Quecksilber enthält, von welchem der pos. Polplatindraht in Glas eingeschmolzen hinaufgeht; auf dem Quecksilber liegt ein Kuchen von Quecksilbersulfat mit Zinkvitriol getränkt, worin ein Zinkstab taucht. — Das praktische Messen der elektromotorischen Kraft kann auf 2 Arten geschehen, entweder durch Messen der Spannung oder durch Messen der Stromstärke, da aus dieser nach dem Ohm'schen Gesetze ($i = e : w$) die elektrom. Kr. durch Division mit dem Widerstande gefunden werden kann. Die Spannung kann deßhalb zum Messen der elektrom. Kr. benutzt werden, weil das Potential gleich Spannung mal Weg, also bei gleichen Wegen der Spannung proportional ist; es genügt, für irgend eine Spannung das Potential zu kennen, dann kann es auch für jede andere gefunden werden. Um die Spannung direct zu messen, ist das Thomson'sche Quadrantelektrometer sogar für die schwachen Ströme kleiner Batterien ausreichend, also gewiß für die starken Ströme der Elektrotechnik. Indessen sind für diese in neuerer Zeit vorzügliche Instrumente construirt worden, so das Spiegelgalvanometer und das Torsionsgalvanometer von Siemens und Halske. Bei beiden ist das Hauptelement ein **Glockenmagnet**, d. i. ein magnetisirtes, hohles Stahlcylinderchen von noch nicht 2cm Länge und 4mm Dm., das am einen Ende offen und am anderen durch eine Kugelschale geschlossen ist, während der Cylindermantel an zwei diametralen Stellen vom offenen bis zum Kugelende aufgeschlitzt ist; diese Form hat nach der Theorie den Vorzug, daß ihre Schw. durch eine dämpfende Kupferhülle beseitigt werden, wodurch das Galvanometer aperiodisch wird. In dem **Spiegelgalvanometer** hängt der Glockenmagnet an einem Coconfaden, der auch ein leichtes Spiegelchen trägt, an welchem die Ablenkung abgelesen wird. Das weniger genaue, aber leichter transportable und für die Praxis geeignetere **Torsionsgalvanometer** ist in Fig. 306 abgebildet. G ist der Glockenmagnet, der zwischen den zwei Spulrahmen R hängt, welche von den Klemmschrauben her in ihre zahlreichen Drahtwindungen den Strom aufnehmen. Weil diese Windungen auch mit einem schwachen Strome kräftig genug wirken, sowie nach der Theorie des Galvanometers (502. 12), ist auch in den äußeren Stromkreis ein großer Widerstand eingeschaltet. Das Glockenmagnetchen hängt an einem Coconfaden, der in der Röhre m um den Stift s gewickelt ist; an dem Stiel des M. befindet sich auch die Torsionsfeder f, die oben an der losen Büchse bb befestigt und sammt dem Federzeiger mit der Büchse gedreht werden kann; ein zweiter Markirzeiger z ist mit dem M. verbunden. Dieser wird auf den Nullpunkt der Kreistheilung D gestellt, ehe der Strom eingelassen wird; ist dann der Strom geschlossen und dadurch der M. und sein Zeiger z abgelenkt, so dreht man mit der Büchse m die Feder so lange, bis der Markirzeiger wieder auf dem Nullpunkte steht; die Größe dieser Drehung des Federzeigers läßt die Spannung berechnen, indem man nach dem Versuche mit dem Strome den Versuch mit einem Normalelement wiederholt und die beiden Drehungen vergleicht; aus den bekannten Volts des Normalelements sind die Volts des Stromes leicht zu berechnen.

Fig. 306.



Da die potentielle Energie einer gewissen Quantität von El. nach 480. gleich dem halben Product des Potentials und der Quantität ist, so ist für den el. Strom der **Effect gleich dem Product aus Potential und Stromstärke**; denn jedes Potential bezieht sich auf die Erde, also auf das Potential

Null; im el. Str. aber hat der neg. Pol dasselbe aber entgegengesetzte Potential wie der pos., wodurch die Potentialdifferenz oder elektromotorische Kraft den doppelten Werth erhält; außerdem ist der Effect die Arbeit in 1 Sec.; statt Quantität muß daher die Stromstärke gesetzt werden, da sie die in 1 Sec. fließende El. angibt. Das Product aus Potential und Stromstärke oder aus Volts und Ampères enthält Einheiten, die man entsprechend Voltampères nennt; durch Division mit 9,808 werden sie in Meterkilogramme, durch Division mit 9,808.75 oder mit 734 in Pferdekräfte (Horse-Powers HP) verwandelt. Jedoch haben Ayrton und Perry, Uppenborn, Siemens und Halske auch Energiemesser construirt, mittels deren die Anzahl der HP direkt gefunden werden kann.

d. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm. Nach dem Ohm'schen Gesetze ist $w = e/i = m^{1/2}l^{3/2}t^{-2}/m^{1/2}l^{1/2}t^{-1} = lt^{-1} = 10^9$ cm sec^{-1}. Das Ohm soll nach dem Congreß der Elektriker von 1884 = 1,06 Siemens'schen Einheiten (S.E) sein, wonach 1 S.E = 0,9434 Ohm wäre, während Kohlrausch die S.E = 0,9717 Ohm fand. Jedenfalls sind Ohm und S.E nur wenig verschieden, und die internationale Commission, welche nach dem Congreß der Elektriker das Ohm in der Länge einer Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt ausdrücken soll, wird dieselbe nur wenig länger als 1 m finden. Der innere Widerstand des Daniell'schen Elementes ist etwa = 1 Ohm oder 1 S.E; da die elektromotorische Kraft desselben auch etwa = 1 Volt ist, so ist der Strom dieses Elementes, wenn es durch einen kurzen dicken Kupferdraht geschlossen wird, i = 1 Volt / 1 Ohm = ein Ampère. Eine Million Ohm heißt ein Mega-Ohm, 1 Milliontel Ohm ein Mikro-Ohm; in ähnlicher Weise werden Vielfache der anderen Einheiten bezeichnet.

e. Die Einheit der Capacität (Ladungs- oder Fassungsvermögen) heißt ein Farad. Nach 480. ist die Capacität $= \varepsilon / v = \varepsilon / e$; also ist 1 Farad = 1 Coulomb / 1 Volt $= m^{1/2}l^{1/2}/m^{1/2}l^{3/2}t^{-2} = l^{-1}t^2 = 10^{-9}$ cm^{-1}sec^2. Das Farad ist dadurch bestimmt, daß 1 Coulomb in 1 Farad 1 Volt gibt.

507

Aufg. 773. Warum gibt die Influenzmasch. keinen eigentlichen el. Strom? And.: Die Saugspitzen wirken nicht continuirlich. — A. 774. In wiefern widerspricht Contactel. dem Princip von der Erhaltung der Kraft? And.: Arbeit kann nicht aus Nichtarbeit entstehen. — A. 775. In welchem Falle könnte dennoch Contactel. vom Princip der Erhaltung der Kraft aus zugegeben werden? And.: Annäherung, Druck, Entf. der Platten. — A. 776. An der Volta'schen Säule die Verdoppelung der freien El. des einen Poles durch Berührung des anderen zu erklären. — A. 777. Welche Nachtheile hat Volta's Becherapparat, der Trogapparat und der Wollaston'sche Zellenapparat? — A. 778. Die Constanz von Bunsens Kette, von Meidingers Kette, von Leclanchés Kette und von den anderen in 495. noch angegebenen Ketten durch ausführliche Darstellung der chem. Processe zu erklären. — A. 779. Das Princip von der Erhaltung der Kraft an den Erscheinungen von Peltiers Kreuz nachzuweisen (s. 496.). — A. 780. Eine Zink- und Kupferdoppelplatte, deren el. Differenz = 2d ist, wird an der Kupferplatte mit einem Leiter von n mal größerer Oberfläche verbunden; wie groß ist dann die el. Dichte? Aufl.: Dichte der pos. El. $2d(n+1)/(n+2)$, der neg. El. $= 2d/(n+2)$. — A. 781. Wie stellt sich eine Magnetnadel, wenn der Strom auf dem magn. Meridian senkrecht steht? Aufl. (?) — A. 782. Wie groß ist die Stromwirkung auf die Nadel, wenn der Strom im magn. Meridian liegt und die Nadel um 45° abweicht? Aufl.: Gleich der erdmagn. Wirkung. — A. 783. Denken wir uns, daß die erdmagn. Wirkung auch eine Stromwirkung sei, die ihren Sitz in dem magn. Nordpole habe; wieviel mal größer müßte diese Stromkraft sein als die desjenigen Stromes, der um 1 dm von der Nadel entfernt diese auf 45° stellt, an einem Orte, der um n° von dem Nordpole entfernt ist? Aufl.: n . 15 . 7420 . 10 nach Biot-Savarts Gesetz (497.) — A. 784. Biot und Savart fanden ihr Gesetz durch die Schwingungsmethode; in einer Entf. von 3 cm machte eine Nadel in 1 Min. 12 Schw.; wieviel mußte sie in in 5 cm Entf. vollbringen? Aufl. 9,2 Schw. — A. 785. Welche Windungen eines Multiplicators haben auf welchen Theil einer astatischen Nadel entgegengesetzte Wirkung; haben diese Windungen deßhalb keine Wirkung? — A. 786. Wie stellt sich eine astatische Doppelnadel, deren beide Theile nicht parallel sind? Aufl.: Der Meridian halbirt den Nadelwinkel; Beweis. — A. 787. Wie stark ist der Strom, der in

12 Min. bei 20° Wärme und 750^{mm} Barometerstand 4000^{ccm} Knallgas liefern? Aufl.: (4000 / 12) (750 / 760) / (1 + 0,003665 . 20) = 306,48. — A. 788. Wie groß ist die Reductionsconstante der in diesen Strom eingeschalteten Tangentenbussole, wenn an derselben eine Ablenkung von 35° beobachtet wird? Aufl.: $A = i / \tang \alpha = 437,8$. — A. 789. Welches ist die Stromstärke, wenn durch Einschalten einer Kette derselben Art die Ablenkung auf 49° gesteigert wird? Aufl. 503,52. — A. 790. Zu beweisen, daß in einem Stromkreise aus verschiedenen Leitern die Gefälle den Querschnitten umgekehrt, den spec. Widerständen direct prop. sind. — A. 792. Zu beweisen, daß die Gefälle prop. sind der Differenz der el. Dichten zu beiden Seiten der Erregungsstelle. Anl.: Die Gefällcurven zu zeichnen und das Ohm'sche Gesetz zu benutzen. — A. 793. Welchen Querschnitt muß ein 150^{cm} langer Draht haben, um denselben Widerstand zu leisten, wie ein 80^{cm} langer Draht von 1^{qmm} Querschnitt aus demselben Stoffe? Aufl.: $1,875^{qmm}$. — A. 794. Wie lang muß ein Eisendraht von 3^{mm} Dicke sein, um denselben Widerstand zu leisten, wie ein 1000^{m} langer Draht von 2^{mm} Dicke? Aufl.: 2250^{m}. — A. 795. Die elektrom. Kraft eines Bunsen'schen Elementes ist e, der wesentliche Widerstand w = 1; wie groß ist die elektrom. Kraft und der Widerstand in einer Batterie von 8 El., in der das Zink eines El. mit der Kohle des folgenden verbunden ist? Aufl.: 8e und 8. — A. 796. Wie groß sind beide, wenn die Zinke, wie die Kohlen paarweise verbunden sind? Aufl.: 4e und 2. — A. 797. Wie groß, wenn immer 4 Zinke und 4 Kohlen mit einander verbunden sind? Aufl. 2e und $^1/_2$. — A. 789. Wie groß, wenn alle 8 Zinke und alle 8 Kohlen verbunden sind? Aufl.: e und $^1/_8$. — A. 799. Wie groß ist in den 4 Fällen die Stromstärke, wenn der äußere Widerstand = der reducirten Länge l ist? Aufl.: $8e / (8 + l)$; $4e / (2 + l)$; $2e / (^1/_2 + l)$; $e / (^1/_8 + l)$. — A. 800. Wie groß sind in allen 4 Fällen die Stromstärken, wenn $l = 8$, 2, $^1/_2$ und $^1/_8$? Aufl.: $^1/_2$e, $^2/_5$e, $^4/_{17}$e, $^8/_{65}$e; $^4/_5$e, e, $^4/_5$e, $^8/_{17}$e; $^{16}/_{17}$e, $^8/_5$e, 2e, $^8/_5$e; $^{64}/_{65}$e, $^{32}/_{17}$e, $^{16}/_5$e, 4e. — A. 801. Welche Regel wird durch diese Zahlen bestätigt? Aufl.: Folgerung 9 des Ohm'schen Gesetzes. — A. 802. Der innere Widerstand eines von n Elementen sei w; in wie viele Gruppen, deren einzelne gleichartige Platten mit einander verbunden sind, muß man sie eintheilen, um das Max. der Stromstärke zu erzielen, wenn der äußere Widerstand = l ist? Aufl.: $x = \sqrt{(nl / w)}$. — A. 803. Welche der oben angegebenen Gruppirungen ist anzuwenden, wenn w = 20 und $l = 40$? Aufl.: A. 796. — A. 804. Wie groß ist die Stromstärke bei diesen Daten bei allen 4 Gruppirungen der 8 Bunsen'schen Ketten? Aufl.: $^1/_{25}$e, $^1/_{20}$e, $^1/_{25}$e, $^1/_{45}$e. — A. 805. Zwei Elemente seien in 2 Leitungen a und b eingeschaltet, die sich zu einem 3ten Drahte c vereinigen; wie groß sind in den 3 Leitungen die Intensitäten i, i' und i'', wenn die Widerstände derselben = w, w' und w'' und die el. Kräfte der Ketten e und e' sind? Anl.: Nach Kirchhoffs Gesetzen ist $i - i' - i'' = 0$; dann $iw + i'w' = e$; $iw + i''w'' = e'$; $i'w' - i''w'' = e - e'$. Hieraus folgt $i = (e'w' + ew'') / (ww' + ww'' + w'w'')$; $i' = [e(w + w'') - e'w] / (ww' + ww'' + w'w'')$; $i'' = [e'(w + w') - ew] / (ww' + ww'' + w'w'')$. — A. 806. In der Poggendorff'schen Compensationsmethode zur Bestimmung der elektrom. Kraft wird die Verzweigung der vorigen Aufgabe so angewendet, daß $i'' = 0$ wird; in welchem Verhältnisse stehen dann die elektrom. Kräfte der beiden Ketten; Aufl.: $e' = ew / (w + w')$. — A. 807. In einer Batterie von n El. sollen die Platten s mal größer gemacht, aber auch s mal weniger El. genommen werden; wie groß ist die Stromstärke, wenn w der innere, l der äußere Widerstand und e die el. Kraft eines El. ist? Aufl.: $(ne / s) / [(nw / s^2) + l]$. — A. 808. Wie groß ist die Stromstärke vor und nach dieser Theilung, wenn ursprünglich 12 El. vorhanden sind, deren elektrom. Kraft 500, wesentlicher Widerstand = 20, äußerer Widerstand = 30 Silbereinheiten beträgt, und wenn s = 3 sein soll? Aufl.: i = 24 und 35,3. — A. 809. Welche Länge muß ein Eisendraht haben, damit er denselben Widerstand leiste, wie ein gleich dicker Kupferdraht von 1^{m} Länge? Aufl.: 17^{cm}. — A. 810. Welche Dicke muß ein Platindraht von 80^{cm} Länge besitzen, damit er denselben Widerstand leiste, wie ein Silberdraht von 1^{m} Länge und 3^{mm} Dicke? Aufl.: $6,7^{cm}$. — 811. Eine mit dem Beginne des Rheostaten eingeschaltete Tangentenbussole zeigte eine Ablenkung von 36°; als nun voran gedreht wurde um 3^{m} des $1,2^{mm}$ dicken Argentandrahtes, ging die Nadel auf 10° zurück; wie groß ist der wesentliche Widerstand w und die elektrom. Kraft? Aufl.: Die reducirte Länge des Argentandrahtes ist 26; daher $A \tang 36 = e / w$; $A \tang 10 = e / (w + 26)$; hieraus $w = 26 \tang 10 / (\tang 36 - \tang 10) = 8,332$ und $e = 26 A \tang 10 \tang 36 / (\tang 36 - \tang 10) = 6,0535 A$. — A. 812. Die elektrom. Kraft eines El. sei = 600, der wesentliche Widerstand = 15 S.-E., der Schließungsbogen ein Kupferdraht von 6^{m} Länge und 2^{mm} Dicke. Wie groß ist die Stromstärke? Aufl.: Red. Länge des Drahtes = 1,62; i = 600 / (15 + 1,62) = 36,1. — A. 813. Zwölf Bunsen'sche El. mit einem inneren Widerstande = 15 und einem äußeren Widerstande = 20 sollen zu einer Batterie verbunden werden; welche Aufstellung ist die günstigste? Aufl.: Als 12 einfache i = 12 . 800 / (12 . 15 + 20) = 48; als 6 doppelte i = 6 . 800 / (6 . $^{15}/_2$ + 20) = 74; als 4 dreifache i = 4 . 800 / (4 . 5 + 20) = 80; als 3 vierfache i = 3 . 800 / (3 . $^{15}/_4$ + 20) = 77; als 2 sechsfache i = 2 . 800 / (2 . $^{15}/_6$ + 20) = 64; als ein zwölffaches i = 800 / ($^{15}/_{12}$ + 20)

= 38; also als 4 dreifache. — A. 814. Es sei ein Eisendraht von 20m Länge und 2mm Dicke eingeschaltet; wie groß ist im ersten Falle die Stromstärke von 6 Bunsen'schen Elementen von einer el. Kraft = 900 und einem wesentlichen Widerstande = 10? Aufl.: 56.

3. Wirkungen des elektrischen Stromes.

a. In dem Stromkreise.

Die Wirkungen des elektrischen Stromes auf die Körper zerfallen in zwei Abtheilungen, in Wirkungen auf Körper in dem Stromkreise und in Wirkungen auf Körper außerhalb des Stromkreises oder Fernewirkungen. Die ersteren sind: 1. Die physiologische Wirkung, 2. die Wärmewirkung, 3. die Lichtwirkung, 4. die chemische Wirkung, 5. die mechanische Wirkung.

508 1. Die physiologische Wirkung des elektrischen Stromes ist die Wirkung desselben auf den menschlichen, thierischen und Pflanzenkörper, wenn ein solcher oder Theile eines solchen in den Stromkreis eingeschaltet sind. Da der menschliche Körper ein wenig guter Leiter ist, so ist für solche Wirkungen nach Ohms Gesetz eine vielplattige Batterie, z. B. eine Volta'sche Säule nöthig. Wenn der elektrische Strom durch den menschlichen Körper geht, so empfindet man beim Schließen und Oeffnen eine schmerzhafte Zuckung; während des Durchgehens empfindet man bei einem schwachen Strome nichts oder höchstens ein Brennen an verletzten Stellen der die Pole berührenden Theile, bei einem starken Strome aber eine continuirliche innere Erschütterung, der bei längerer Dauer ein allgemeines Uebelbefinden folgt. Auch an Leichen nicht lange nach dem Tode werden die Muskelverziehungen oft in erschreckender Weise wahrgenommen, und selbst an sensitiven Pflanzen sind zuckende Bewegungen beim Oeffnen und Schließen beobachtet worden. Ein schwacher Strom beim Oeffnen und Schließen durch dem Auge benachbarte Theile erzeugt einen Lichtschein, in der Nähe des Ohres ein Sausen, und der positive Pol hat einen sauren, der negative einen alkalischen Geschmack, wenn der Strom durch den Mund geht.

Man beobachtet die Zuckungen am einfachsten, wenn man die mit gesäuertem Wasser angefeuchteten Finger auf die beiden Pole einer Volta'schen Säule legt; um sie öfter zu wiederholen, berührt man mit der einen Hand mehrmals rasch hinter einander, oder man schaltet ein Blitzrad in den Schließungsdraht ein; die einfachste Form desselben ist ein Zahnrad, auf dessen Zähnen eine Metallfeder schleift, zu welcher der eine Poldraht geht, während der andere mit der Radachse verbunden ist. Der in den einen Draht eingeschaltete Mensch hält die Enden desselben mittels cylindrischer Handhaben in befeuchteten Händen. Berührt bei dem Drehen des Rädchens die Feder einen Zahn, so ist der Strom geschlossen, ragt sie in eine Zahnlücke, so ist der Strom geöffnet; man kann auf diese Weise die Zuckungen auch durch eine Menschenkette schicken. Diese Zuckungen sowohl als auch der durchgehende constante Strom werden medicinisch verwendet. Ure hat an einem eine Stunde vorher Gehängten, der an Kopf und Füßen mit den 2 Polen verbunden war, durch die Muskelzuckungen den wechselnden Ausdruck der verschiedensten Empfindungen und Leidenschaften im Gesichte, ja sogar ein tiefes und angestrengtes Athmen wahrgenommen; auch an Thierleichen wurden solche Versuche gemacht, sowie an einzelnen Muskeln. Man schreibt den Nerven die Leitung der El. in solchen Fällen zu und nennt den von einem constanten Strome in einem Nerven hervorgerufenen Zustand den Elektrotonus, und einen von fortwährend unterbrochenen Strömen durchflossenen Nerven einen tetanisirten Nerven, weil ein solcher in dem zugehörigen Muskel eine dauernde Contraction, den Tetanus hervorruft. Die Wirkung auf das Auge wird wahrgenommen, wenn man mit dem einen Poldrahte das Gesicht in der Nähe des Auges berührt, während man den anderen in der Hand hält; ebenso bringt man für die Gehörwirkung den einen Poldraht ins Ohr und für die Geschmackwirkung auf die Zunge.

Wie der el. Strom Lebenserscheinungen hervorruft, so bringen umgekehrt viele Lebenserscheinungen el. Ströme hervor. Am bekanntesten ist dies vom Zitteraal, Zitterrochen und Zitterwels; man erhält einen Schlag, wenn man mit beiden Händen diese Thiere berührt, ja nach Davy mittels eines Drahtes chemische, magn. und Wärmewirkungen, ja sogar Funken. Beim Zitteraal liegt das el. Organ im Schwanztheile und besteht aus 400 zellgewebartig in mehreren Reihen neben einander stehenden Säulchen. Verbindet man

die Enden eines empfindlichen Multiplicators mit dem Becken und dem Fuße eines Frosches, so zeigt die Nadel einen Strom an, den man **Froschstrom** nennt; derselbe ist wohl nur eine Folge des von Dubois-Reymond aufgefundenen **Nerv-Muskelstromes**, der an jedem Muskel und jedem Nerv gezeigt werden kann, wenn man von einem Punkte eines Längsschnittes zu einem Punkte eines Querschnittes einen um ein empfindliches Galvanometer gehenden Draht führt, und der nach jenem Forscher sich ändert, wenn eine Lebenserscheinung in Nerv und Muskel auftritt. Eine Folge dieses Stromes ist die merkwürdige Erscheinung, daß man durch Krümmen eines Fingers die Nadel eines eigens für diesen Versuch construirten, höchst empfindlichen, mehr als 6000 Windungen enthaltenden Galvanometers ablenken kann, dessen Drahtenden in 2 Glasgefäße voll Salzwasser tauchen; steckt man in jedes Gefäß einen Finger und krümmt den einen für einige Zeit, so bemerkt man eine Ablenkung an der Nadel.

509 2. **Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes**; das galvanische Glühen, die Incandescenz. **Wenn der elektrische Strom durch einen dünnen Metalldraht geht**, so erfährt derselbe eine Temperaturerhöhung, die bei hinreichend starkem Strome bis zur Gluth, ja bis zum Schmelzen des Drahtes steigen kann. Die in einer bestimmten Zeit entwickelte **Wärmemenge** ist dem Leitungswiderstande des Drahtes und dem Quadrat der Stromstärke proportional (Joules Gesetz 1841). Dieses Gesetz läßt sich mittels der Potentialtheorie einfach beweisen: Die Entstehung der Wärme ist eine Verwandlung der Arbeit des el. Stromes in Wärme; die potentielle Energie des Stromes in einer Secunde ist aber gleich dem Product des Potentials oder der elektromotorischen Kraft mit der Stromstärke; also ist auch die in einer Sec. entwickelte Wärmemenge $= Vi = ei$; da nun nach Ohms Gesetz $e = iw$, so ist sie auch $= i^2w$ und in t Sec. $Q = i^2wt$. Von Joule, Ed. Becquerel (1848) und Lenz (1844) wurde das Gesetz durch Versuche zunächst für feste Leiter, von Joule selbst auch für Flüssigkeiten bestätigt. Demnach gilt Joules Gesetz nicht blos für einen Draht, sondern auch für den ganzen Stromkreis. Da nach dem Beweise Q auch $= eit$, so ist die Wärmemenge auch dem Product der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke proportional. Diese Form des Joule'schen Gesetzes stimmt überein mit dem Rieß'schen Gesetze über die beim el. Schlage durch einen Metalldraht entwickelte Wärmemenge.

Lenz wandte bei seinen Untersuchungen eine umgestürzte mit ihrem Stöpsel auf ein Brett befestigte Flasche an, durch deren Stöpsel die Poldrähte zu 2 Platinklötzchen gingen, von denen ein gewundener, durch seine eigene Festigkeit sich aufrecht haltender Platindraht in die Höhlung der Flasche ging, die mit Spiritus erfüllt war; durch einen in dem oben befindlichen Flaschenboden steckenden Stöpsel ging ein Thermometer in die Flüssigkeit. In den Stromkreis war ein Rheostat und eine Tangentenbussole eingeschaltet, so daß jede Änderung der Stromstärke an der Bussole erkannt und durch Drehung an dem Rheostaten aufgehoben werden konnte. — Bei der Untersuchung der Flüssigkeiten mußte Joule den zersetzenden Einfluß des Stromes aufheben; in einer Kupfervitriollösung geschah dies dadurch, daß die beiden Platinklötzchen durch Kupferbleche ersetzt wurden; soviel Kraft durch Zersetzung des Kupfervitriols verzehrt wurde, ebenso viel wurde dann dadurch erzeugt, daß das an den positiven Pol gehende SO_4 sich dort mit dem Kupfer wieder zu Kupfervitriol verband.

510 **Die Temperaturerhöhung** eines galvanisch erwärmten Drahtes ist dem sp. Leitungswiderstande desselben und dem Quadrat der Stromstärke direct, dagegen dem Emissionsvermögen und der 3. Potenz des Durchmessers umgekehrt proportional.

Beweis. Es seien d, l und a der Dm., die Länge und das Ausstrahlungsvermögen des Drahtes und u der Ueberschuß seiner Temp. über die seiner Umgebung, so ist die in 1 Sec. ausgestrahlte Wärme $= \pi d l a u$; die in 1 Sec. durch den el. Strom entstehende Wärme ist $= i^2w$. Die Temp. des Drahtes ist constant, wenn die in 1 Sec. zugeführte Wärme der in derselben Zeit ausgestrahlten Wärme gleich ist, wenn also $\pi d l a u = i^2w$. Ist nun der spec. Leitungswiderstand des Drahtes $= s$, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze $w = 4sl/(\pi d^2)$. Durch Einsetzung dieses Werthes in die vorhergehende Gl. ergibt sich der Temperaturüberschuß $u = 4si^2/(\pi^2 a d^3)$, womit der Satz bewiesen ist. Die hierin liegende Folgerung, daß ein Draht um so leichter glüht, je größer sein Leitungswiderstand ist, steht im Einklange mit der Verwandlung von Stromarbeit in Wärme; je größer der Widerstand ist, desto mehr von der Stromstärke wird zur Ueberwindung des Widerstandes verbraucht, desto mehr Wärme entsteht also auch. Drähte von Kupfer und Silber sind schwer

um Glühen zu bringen, Platin- und Eisendrähte leichter; besonders schön ersieht man dies mit einer aus Silber- und Platingliedern zusammengesetzten Kette; letztere glühen schon, wenn erstere noch dunkel sind. Weil glühendes Eisen so leicht schmilzt und verbrennt, so haben glühende Platindrähte eine vielfache Verwendung. — Die zweite Folgerung aus dem Gesetze, daß dünne Drähte viel leichter glühen als dicke, läßt sich mit einer Batterie von 10 Bunsen'schen Elementen leicht erfahren; die Glühversuche erfordern überhaupt eine starke Batterie, weil die Gluth die Leitungsfähigkeit vermindert; ein Platindraht von 1^{dm} Länge und $\frac{1}{2}^{mm}$ Dicke kommt leicht mit jener Batterie zur Weißgluth, bleibt aber bei 1^{mm} Dicke völlig dunkel. — Die dritte Folgerung, daß die Temp. von der Drahtlänge abhängig sei, findet man mit Versuchen dieser Art nicht bewährt; denn ein 2^{dm} langer Draht glüht ebenfalls schon nicht mehr. Aus dem Joule'schen Gesetze geht diese Thatsache leicht hervor, wenn man sich erlaubt, vom inneren Widerstande der Kette abzusehen. Ein doppelt solanger Draht macht nach Ohm's Gesetz den Strom 2 mal schwächer, also die Wärmewirkung nach Joules Gesetz 4 mal schwächer; dabei wird aber der Widerstand nach Ohms Gesetz 2 mal größer, also die Wärmewirkung nach Joules Gesetz 2 mal stärker; durch beide Einflüsse zusammen wird die Wärmemenge 2 mal kleiner. Dieselbe vertheilt sich nun noch auf eine 2 mal größere Masse, deren Ausstrahlung ebenfalls 2 mal größer wird; also muß die Temp. ebenfalls viel niedriger werden. Man kann daher als Folgerung aus dem Joule'schen Gesetze aussprechen: die Temp. des galvanischen Glühens ist um so höher, je kürzer, dünner und weniger gut leitend der Draht ist und je stärker der Strom ist. In der Medicin hat das galvanische Glühen von Platindrähten erweiterte Anwendung gefunden, so in der Galvanokaustik oder Kauterisation, z. B. zum Abbrennen von Geschwulsten durch eine Schneideschlinge von glühendem Platindraht, zur inneren Erleuchtung des menschlichen Körpers u. s. w. Die bedeutendste Anwendung ist dem galvanischen Glühen in den letzten Jahren erwachsen durch die Incandescenzlampe oder das elektrische Glühlicht, wodurch das lange besprochene Problem der Theilung des el. Lichtes in unerwarteter Weise gelöst ist. Schon 1845 nahm King ein Patent, das sich auf einen im Vacuum glühenden Kohlenstab und auf einen in freier Luft glühenden Platindraht bezog. Auch Swan will schon vor 20 Jahren Kohlenstreifen verschiedener Art im luftverdünnten Raume zu leuchtender Gluth gebracht haben, die jedoch wegen mangelhafter Verdünnung nicht lange hielt; nachdem durch Sprengels Luftsauger die Verdünnung fast bis zum Vacuum getrieben werden konnte, nahm er 1877 seine Versuche mit Cartonkohle wieder auf, gelangte aber allmälig dazu, einen haardünnen Kohlenfaden von der Härte des Feuersteins aus Baumwolle angefertigt als das beste Material anzuwenden. Die Swan'sche Glühlichtlampe hat jetzt schon eine bedeutende Verbreitung; die auf der Pariser Ausstellung vorgeführten Lampen zum Preise von 25 Frcs. erzeugen ein goldgelbes Licht, bieten einen Widerstand von 30—90 Ohm und eine Stromstärke von 0,92 Ampères; die Arbeit für eine Lampe von etwa 20 Normalkerzen Lichtstärke beträgt ungefähr $\frac{1}{10}$ Pferdekraft. Auch Edison wandte sich, da er 1877 Platinspiralen wegen ihres Schmelzens erfolglos versucht hatte, 1879 dem Kohlenglühlichte zu; sein Kohlenstreifen hat die Form eines Hufeisens EF (Fig. 307), so dünn wie ein Pferdehaar und so fest wie Stahl; derselbe ist in einem luftleeren Glasballon eingeschlossen und durch Platindrähte C und G mit den Klemmschrauben X verbunden, die durch Zweigdrähte mit der Hauptleitung in Verbindung stehen; der el. Strom fließt auf diese Weise durch die Kohle und bringt den Kohlenfaden zur Gluth, die freilich öfter nur Rothgluth sein soll. Nach Wiedemanns Untersuchung braucht eine Edison'sche Lampe für 10 Normalkerzen Lichtstärke $\frac{1}{12}$ Pferdekraft, weil ihr Widerstand = 76 Ohm und ihr Strom = 0,905 Ampères sei. Indessen ist doch nicht zu verkennen, daß durch diese Incandescenzlampen die Theilung des el. Lichtes in unerwartet weitgehender Weise gelungen ist und Lichtquellen von geringer Stärke, den Gasflammen gleich, hergestellt wurden, während das eigentliche el. Kohlenlicht nur in übermäßig starken Lichtquellen auftritt. Werdermann und Reynier hatten (1878) schon die Incandescenz in anderer Weise zur Lichterzeugung benutzt, der erstere durch Berührung eines Kohlenstiftes mit dem Mittelpunkte einer kreisförmigen Kohlenscheibe, der letztere durch Berührung mit dem Rande einer sich drehenden Kohlenscheibe; Lampen solcher Art können zu Hunderten in einen Stromkreis eingeschaltet werden, da die Berührungsstelle nur einen eringen Widerstand erzeugt.

Fig. 307.

511 3. **Lichtwirkung des elektrischen Stromes.** Wenn man den metallischen Schließungskreis eines kräftigen galvanischen Stromes an irgend einer Stelle unterbricht, so springt zwischen den Unterbrechungsstellen, Elektroden genannt, ein Funke über. Der galvanische Funke ist nicht wie der elektrische Funke eine Vereinigung der beiden El. in der Luft, sondern eine Glüherscheinung.

Denn Jacobi (1847) näherte die Enden des Schließungsdrahtes einer aus 12 Platin-Zink-Elementen bestehenden Säule bis auf 0,00127mm, ohne daß ein Funke übersprang; daraus folgt, daß der galv. Funke dem gewöhnlichen el. nicht identisch ist; er entsteht nur, wenn die Elektroden in Berührung waren. Beim Aufhören der Berührung sind die letzten Mol. der Elektroden noch vom el. Strome durchflossen, sie bilden einen unendlich dünnen und unendlich kurzen Draht, der nach Joules Gesetz in die höchste Gluth geräth. Höchste Gluth aber ist heftigste Bewegung der Mol.; deßhalb werden die Mol. losgelöst und vom pos. Strom zur neg. Elektrode gerissen; der Funke ist daher um so lebhafter, je leichter die Theilchen sich loslösen, am lebhaftesten, wenn man die Drahtenden in Quecksilber taucht und das eine herauszieht, woraus auch folgt, daß die Farbe des Funkens vom Metall der Elektroden abhängt. Ein andauerndes Funkensprühen entsteht, wenn die eine Elektrode mit einer Feile verbunden, und mit der anderen auf dieser hingefahren wird. Wenn nun gewöhnliche Batterien nur solche galv. Funken bilden, so können starke Batterien auch gewöhnliche el. Funken erzeugen. Gassiot (1841) construirte eine Batterie von 3500 Elementen, aus Kupfer und Zink in Regenwasser bestehend, und erhielt bei Annäherung der Elektroden bis auf 0,25mm Abstand Funken, welche 5 Wochen lang ununterbrochen übersprangen; die freie El. der Elektroden war auch so stark, daß ein Elektroskop schon in einer Entf. von 6—8cm divergirte. — Die galvanische Lichterscheinung wird ununterbrochen, wenn zu den Elektroden ein Stoff genommen wird, dessen Theilchen sich leicht loslösen, worin nach allen Richtungen nur Kohle genügt

Der galvanische Lichtbogen (Davy 1821) entsteht, wenn man die Drahtenden mit Kohlenstiften verbindet, die Spitzen derselben zur Berührung bringt und sie dann vorsichtig von einander entfernt; es bildet sich dann zwischen den Kohlenspitzen ein anhaltender Lichtbogen von blendendem Glanze. Derselbe entsteht dadurch, daß bei der Trennung der sich zuletzt berührenden Spitzen dieselben in galv. Glühen gerathen, wodurch die Theilchen losgerissen werden und von Pol zu Pol strömend eine Brücke für den el. Strom bilden. Wegen des großen Leitungswiderstandes dieser Bogenbrücke geräth sie nach Joules Gesetz in lebhaftes Glühen und Verbrennen, eine hohe Temperatur entsteht, wohl über 6000°, durch welche immer neue Theilchen der Kohlenspitzen losgerissen werden und so die Leitung erhalten. Man kann deßhalb die Elektroden nach Herstellung der Brücke noch weiter von einander entfernen. Diese Entfernung wächst mit der Stärke des Stromes, mit der Verdünnung der Luft, besonders aber mit der Flüchtigkeit der Elektroden; zwischen Platinspitzen ist der Lichtbogen am kürzesten, am längsten zwischen mit Glaubersalz oder Aetzkali getränkten Kohlenspitzen. Die pos. Elektrode nimmt stark ab, zeigt sogar eine Grube, die neg. häufig zu; doch findet auch meist eine Abnahme dieser statt; auch die Temp. der pos. Elektrode ist höher als die der neg., während an dieser die Lichtentwickelung energischer auftritt. Die Lichtintensität fanden Fizeau und Foucault bei Anwendung von 46 Bunsen'schen El. = 0,235 des Sonnenlichtes, während sie für das Drumond'sche Kalklicht nur 0,006 angeben. Die prismatische Untersuchung des Lichtbogens zeigt die Linien der Elektrodenstoffe und eine große Zahl chemischer Strahlen.

Zur Erzeugung des galv. Lichtbogens sind wenigstens 10—12 Grove'sche oder Bunsen'sche Elemente nöthig. Davy (1821) wandte eine Volta'sche Säule von 2000 Elementen an und konnte dann die Elektroden um 10cm von einander entfernen; als er die Luft auf 6mm Spannung verdünnte, konnte er die Entf. bis auf 17cm vergrößern. Daß in dem Lichtbogen die Kohlentheilchen nicht blos glühen, sondern auch verbrennen, zeigt sich an der Verminderung des Glanzes in Gasen, welche die Verbrennung nicht unterhalten. Durch das Verzehren der Kohle wird der Abstand der Spitzen vergrößert, der Lichtbogen verlischt daher bald, wenn nicht der Abstand constant erhalten wird durch den **Kohlenlichtregulator** (Foucault 1849); dieser muß indeß nicht nur das Licht constant erhalten und einen sich nicht von der Stelle bewegenden Lichtpunkt erzeugen, sondern auch die anfänglich sich berührenden Elektroden von einander entfernen und beim Verlöschen des Lichtes bei etwa

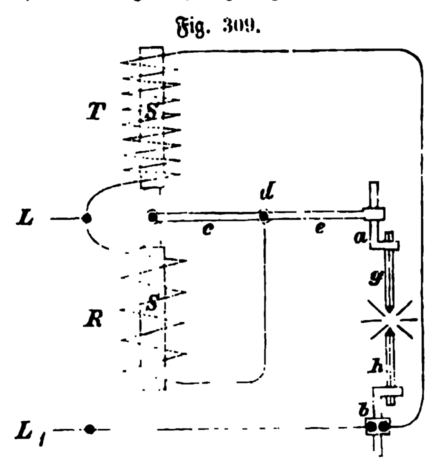
zu großem Abstande wieder zur Berührung und dann abermals aus einander bringen. Solche vollkommene Regulatoren sind sehr kostspielige Apparate mit Uhrwerken, Elektromagneten u. s. w. Indessen gibt es jetzt einfachere Regulatoren von Serrin zu 350 Frcs., von Hefner-Alteneck zu 200 Mark, von Metzger in Freiburg i. B. zu 130 Mark. Wir wollen nur eine einfache Construction beschreiben, welche wenigstens erkennen läßt, wie der el. Strom elbstthätig den Abstand der Kohlenspitzen, die in derselben vertical über einander stehen, egulirt. Der obere Kohlenstift sitzt in einem Arme des Ständers, der mit dem einen Pole n Verbindung steht, der untere in einem beweglichen Träger aus weichem Eisen, der mittels ines über eine Rolle gehenden und von einem Gewichte beschwerten Fadens in die Höhe ezogen werden kann und von einer Spule umgeben ist, deren Draht mit dem anderen Pole in Verbindung steht. Sind die Kohlen in Berührung, so ist der Strom geschlossen; adurch wird der weiche Eisenträger ein Magnet und wird von der Spule nach unten gezogen, wodurch sich der Lichtbogen verlängert; wird er zu lang, so verliert er seine Leitungsfähigkeit, der Strom ist geöffnet und das Gewicht zieht den Träger wieder in die Höhe. Ist das Gegengewicht richtig gewählt im Verhältnisse zur Stromstärke, so bleibt die Distanz und damit auch der Lichtbogen ungeändert. Ist der Lichtbogen so mit einem Regulator versehen, so entsteht die elektrische Lampe, welche zahlreiche Verwendungen hat. Seit der Erfindung von kräftigen und zuverlässigen magnet-elektrischen Maschinen durch Gramme und v. Hefner-Alteneck (532.) gewinnt das el. Licht täglich mehr Ausbreitung auch im gewöhnlichen Leben. Man nennt die magnetel. Maschinen, die zur Herstellung des el. Lichtes im Großen dienen, Lichtmaschinen. Sie werden hauptsächlich zur Beleuchtung von Güterhallen, Bahnhöfen, Fabrikräumen, Hafenhallen u. s. w. benutzt; seit Erfindung von Hefner-Altenecks Differentiallampe breitet sich auch die Anwendung zu Straßen-, Garten- und Hausbeleuchtung immer mehr aus. Die älteren Regulatoren hatten den Nachtheil, daß sich in einen Stromkreis nur eine el. Lampe einschalten ließ; der Widerstand des Volta'schen Lichtbogens ist nämlich sehr groß und sehr unbeständig; sind in eine Leitung auch nur 2 Lampen eingeschaltet, so bringt eine geringe Vergrößerung des Kohlenabstandes in der einen Lampe einen so großen Widerstand hervor, daß die andere sehr schwach leuchtet oder ganz ausgeht. Allerdings konnte man in der einen eingeschalteten Lampe eine außerordentliche Lichtstärke hervorbringen; die gewöhnlichen Lichtmaschinen erzeugen ein Licht von 2000 Normalkerzen, ja man hat schon el. Licht von 100 000 N.-K. hervorgebracht; so starkes Licht, ja auch nur solches von 100—1000 N.-K. ist in vielen Fällen vortrefflich, z. B. für objective Darstellung physikalischer Erscheinungen, für das photoelektrische Mikroskop, Leuchtthürme, Theatereffecte, Festbeleuchtungen, zur tageshellen Beleuchtung der Umgebung belagerter Festungen oder bedrohter Städte im Kriege u. s. w.; aber zur Erleuchtung von geschlossenen oder offenen Arbeitsräumen ist es schon unpraktisch, weil ferne Stellen nach dem Gesetze vom umgekehrten Verhältnisse zum Quadrate der Entf. doch nur schwach erhellt werden und die Schattenräume an den helleren Stellen um so dunkler sind. In solchen Fällen wandte man Lichtmaschinen an, die mehrere Ströme erzeugten, und setzte mit jedem Strome eine Lampe in Gang; man konnte auf diese Weise wenigstens die Arbeit einer Maschine theilen. In den letzten Jahren ist es jedoch auch gelungen, das elektrische Licht selbst zu theilen, in einen Stromkreis mehrere Lampen einzuschalten und zwar durch die Erfindung von Jablochkoffs Kerze (1876) und der Differentiallampe von v. Hefner-Alteneck (1879). Jablochkoffs Kerze ist in Fig. 308 dargestellt; sie besteht aus 2 parallelen Kohlenstiften ab u. cd, die durch eine nichtleitende, aber in der Gluth leitende Substanz (Kaolin, Gips) u. s. w. getrennt und verbunden sind und durch die Klemmschrauben den Strom empfangen; dieser geht anfänglich durch das Graphitblättchen bd, versetzt dieses und hierdurch bald die oberen Enden der Kohlen und des Gipses in Weißgluth, womit der Lichtbogen hergestellt ist. Damit das Abbrennen gleichmäßig stattfinde,

Fig. 308.



werden die Kerzen durch eine Wechselstrommaschine in Gang gesetzt, deren Strom jeden Augenblick die Richtung wechselt. Da der Widerstand hier viel geringer und beständiger ist als in dem gewöhnlichen, lufterfüllten Lichtbogen, so können mit einer 4-stromigen Maschine 16 Kerzen gespeist werden; 3 Jahre lang war die Avenue de l'Opéra in Paris jede Nacht tageshell mit solchen Kerzen erleuchtet. Jedoch haben sie den großen Nachtheil, daß beim Ausgehen einer Kerze alle anderen desselben Stromkreises auch erlöschen, weil beim Erkalten des Zwischengipses derselbe ein schlechter Leiter wird, und daß doch nur 4—5 Kerzen von einem Strome gut im Gange gehalten werden. Beide Mängel sind an der Differentiallampe überwunden. Der Grundgedanke derselben, nämlich die Stromtheilung soll zum erstenmale von Lacassagne u. Thiers (1855) für eine el. Lampe benutzt worden sein; später verwandte Dr. W. Siemens (1873) das Princip der Nebenschließung zur Regulirung einer Lampe, 1878 aber entstanden die Lampen von Lontin, Mersanne und Fontaine, in welchen die Zweigströme zur Regulirung und Theilung dienten; das Vollkommenste bietet v. Hefner-Altenecks Differentiallampe (Fig. 309), in welcher die Regulirung durch die Differenz der Stromwirkungen zweier Zweigspulen auf einen Eisenkern vollbracht wird. In der Figur ist L der Leitungsdraht, der sich nach unten als Spule R von wenigen Windungen dicken Drahtes fortsetzt, dann nach dem Drehpunkt d des Hebels c geht, von welchem der Strom durch den Kohlenhalter a, die 2 Kohlenstifte g und h und den Halter b auf die Fortsetzung L_1 des Leitungsdrahtes gelangt. Von dem Leitungsdraht L geht aber noch ein Zweigdraht aus, der sich nach oben als Spule T von zahlreichen Windungen feinen Drahtes fortsetzt und dann bei b sich wieder mit dem Hauptdraht vereinigt. Sitzen nun z. B. die 2 Kohlenstifte auf einander, so ist der Widerstand im unteren Theile der Lampe gering, der Strom also nach dem Special-gesetze der Stromverzweigung (503.) hier stark, dagegen in der oberen Spule schwach; daher wird der Eisenstab SS und mit ihm die linke Seite des Hebels nach unten gezogen, wodurch die rechte Seite und der obere Stift gehoben, der Lichtbogen hergestellt wird. Sind dagegen die Kohlen zu weit auseinander, so geht durch den unteren Theil gar kein oder nur ein schwacher Strom, durch die obere Spule aber ein starker, der Eisenkern und die linke Seite des Hebels werden nach oben gezogen, also die rechte Seite mit dem oberen Stift gesenkt. Bei der richtigen Länge des Lichtbogens halten sich die Spulwirkungen im Gleichgewicht, bei unrichtiger wird durch ihre Differenz der Kern und der Hebel bewegt und das Gleichgewicht wieder hergestellt. Ist ein Kohlenpaar in Unordnung, so fließt der Strom durch die Zweigleitung weiter und stört die anderen Lampen nicht; deßhalb können 20 und mehr Lampen in eine Leitung eingeschaltet werden. — Die Kohle, welche zu der el. Lampe verbraucht wird, präparirt man aus der sogenannten Retortenkohle, die sich in dichten Schichten an den oberen Stellen der Gasretorten, die am stärksten erhitzt werden, ansetzt; sie ist schwarz, metallisch glänzend, sehr hart und doch porös, und schwierig zu schneiden.

Fig. 309.



512 4. Chemische Wirkungen des galvanischen Stromes. Die Elektrolyse. Wenn ein chemisch zusammengesetzter, leitender, flüssiger oder wenigstens erweichter Körper in den Stromkreis eingeschaltet wird, so wird er in 2 Bestandtheile zersetzt; der pos. Strom führt den positiven Bestandtheil mit sich fort und der neg. Strom den negativen Bestandtheil, oder, wie man den Vorgang auffassen kann, die negative Eintrittstelle des Stromes zieht den positiven, die positive den negativen Bestandtheil an. Diese Erscheinung nennt Faraday (1835) Elektrolyse und den der El. unterworfenen Körper Elektrolyt. Die Drähte oder anderen Metallformen, durch welche der Strom in den Elektrolyt eintritt, heißen Elektroden, und zwar diejenige Elektrode, durch welche der pos. Strom eintritt, die pos. Elektrode oder Anode, und diejenige, durch welche der pos. Strom aus- und der neg. eintritt, neg. Elektrode oder Kathode. Die Zersetzungsproducte

werden Jonen genannt, und zwar das an die Anode tretende das neg. Jon oder Anion und das an die Kathode tretende das pos. Jon oder Kation. Die einfachste Elektrolyse ist die schon in 498. betrachtete des Wassers, bei welcher der Sauerstoff als Anion an die Anode, der Wasserstoff als Kation an die Kathode geht. Die beiden Gase entwickeln sich hier in dem Verhältnisse, wie sie zusammen Wasser bilden, 1 Volumen Sauerstoff auf 2 Volumina Wasserstoff. Der Sauerstoff erscheint jedoch häufig in geringerer Menge, weil er etwas stärker von Wasser absorbirt und an den Elektroden verdichtet wird als der Wasserstoff, weil ein Theil des elektrolytischen Sauerstoffs ozonisirt und mit der Ozonbildung eine Verdichtung verbunden ist, und weil sich dann auch Wasserstoffsuperoxyd an der Kathode bildet, das einen Theil des Sauerstoffs in Anspruch nimmt. Voltametrische Messungen sind daher am genauesten, wenn man nur den Wasserstoff berücksichtigt, und wenn sich dieser an einer kleinen Elektrode ausgeschieden hat.

Die Elektrolyse erklärte man nach Grotthuß folgendermaßen: Man nimmt an, daß die Bestandtheile der Elektrolyten entgegengesetzt el. seien, daß z. B. in jedem Wassermol. der Wasserstoff pos., der Sauerstoff neg. el. ist. Im gewöhnlichen Zustande haben die Mol. alle nur denkbaren Lagen gegen einander; werden sie aber mit einem el. Strome verbunden, so werden die Mol. gedreht, die pos. Atome nach der Kathode, die neg. nach der Anode zu. So drehen sich, wenn z. B. Wasser in den Stromkreis eingeschaltet wird, sämmtliche Mol. so, daß der neg. O jedes Mol. nach der pos. Elektrode, der pos. H nach der neg. Elektrode hin gerichtet ist. Demnach ist in einer zwischen beiden Elektroden befindlichen Molekülreihe der O des ersten Mol. in Berührung mit der pos. Elektrode, wird von dieser angezogen, während der H desselben Mol. von derselben abgestoßen wird; dadurch wird dieses Mol. zerlegt, der O bleibt bei der Elektrode, der H wird an das zweite Mol. gestoßen in enge Berührung mit dem O desselben, der ebenfalls durch die Anziehung und Abstoßung der Elektroden von seinem H getrennt wurde und sich daher mit dem H des ersten Mol. zu einem neuen Wassermol. vereinigt. Dasselbe geschieht durch die ganze Reihe hindurch; der H eines vorausgehenden Mol. vereinigt sich mit dem O des folgenden zu Wasser, so daß in der ganzen Reihe unverändert Wasser vorhanden bleibt, während nur der H des letzten Mol. keinen O mehr findet und daher an der neg. Elektrode übrig ist, die durch ihre Anziehung und Abstoßung an diesem Ende der Reihe gerade so, aber in entgegengesetzter Weise und in entgegengesetzter Richtung wirkt, wie die pos. Elektrode am anderen Ende, wodurch sich die beiden Wirkungen gleich werden und demnach vereinigen. Weil hiermit eine Ausgleichung der El. bewirkt wird, so ist mit der Zersetzung ein el. Strom verbunden, und weil mit der Zersetzung ein el. Strom verbunden ist, so ist für die elektrolytische Wirkung ein Leiter nöthig. Nur leitende Flüssigkeiten erfahren die Elektrolyse, und mit der Elektrolyse geschieht die Leitung; Flüssigkeiten leiten nur dann den Strom elektrolytisch, indem sie zersetzt werden. Nach der ersten Wirkung der Elektrolyse, d. i. nach der ersten Wendung, Spaltung und Vereinigung der Mol. und der hierdurch bewirkten Ausscheidung an den Elektroden wiederholt sich immerfort derselbe Vorgang; wieder werden die Mol. gedreht und zerrissen und zwischen den Elektroden die Atome neu vereinigt und an denselben ausgeschieden. Clausius (1857) machte darauf aufmerksam, daß zum fortwährenden Drehen der Mol. und zum Auseinanderreißen der entgegengesetzt el. und darum sich stark anziehenden Atome eine große Kraft nothwendig sei, daß demnach die Elektrolyse nach dieser Theorie erst bei einer gewissen Stromstärke eintreten könne, während sie doch erfahrungsgemäß derselben proportional sei. Um diesen Widerspruch zu lösen, benutzt Clausius seine jetzt allgemein angenommene Hypothese der molekularen Bewegungen, nach welcher auch die Atome innerhalb der Mol., also die entgegengesetzt el. Jonen gegen einander in Bewegung sind und sich daher nur mit geringer Kraft festhalten, so daß eigentlich in einer Flüssigkeit ein fortwährender Austausch der nach allen Richtungen sich bewegenden Jonen stattfinde. Durch einen el. Strom nun werde diese Bewegung der Atome geregelt, in eine Richtung nämlich nach den Elektroden hin gezwungen, und zwar so, daß die pos. Jonen mit dem pos. Strom nach der Kathode hin, die neg. nach der Anode hin ihre molekulare Bewegung vollbringen; die weiter von den Elektroden entfernten Atome begegnen hierbei immer noch dem entgegengesetzten Jon, vereinigen sich also mit demselben, während für die an die Elektrode grenzenden Atome eine solche Begegnung nicht mehr möglich ist und dieselben daher frei werden.

Weil bei der Elektrolyse der Strom einen großen äußeren Widerstand zu überwinden hat, so muß nach Ohms Gesetz eine vielplattige Batterie genommen werden; besonders ist dies der Fall, wenn man reines Wasser zersetzen will. Hat man aber die Leitungsfähigkeit des Wassers durch etwas Schwefelsäure erhöht, so reichen auch schon zwei Grove'sche Ele-

mente aus. Indessen wäre der Widerstand doch sehr groß, wenn man die Elektroden in Form von Drahtenden anwenden wollte, weil dann die zwischen denselben befindliche Flüssigkeit selbst Drahtform, also einen sehr kleinen Querschnitt hätte; man läßt deßhalb die Drähte in lange und breite Platinblechstreifen übergehen; dies ist die gewöhnliche Form der Elektroden. Bei Anwendung solcher hat der Strom einen großen Querschnitt und daher eine geringe Dichte; es gibt aber auch Fälle, in denen eine große Stromdichte, also ein geringer Stromquerschnitt vorzuziehen ist; so sind z. B. die Störungen bei der Wasserzersetzung um so geringer, je schmaler die Elektroden sind.

513 **Elektrolysen; das elektrolytische Gesetz** (Faraday 1853). Die Wasserstoffsäuren werden in einen Salzbildner und Wasserstoff zersetzt; der Salzbildner geht an die Anode, ist also neg., der Wasserstoff an die Kathode. Die sogenannten Haloidsalze werden ebenfalls in einen an der pos. Elektrode sich sammelnden Salzbildner und in ein Metall zerlegt, das sich an der neg. Elektrode ausscheidet. Die gewöhnlichen Salze erfahren dieselbe Zersetzung in ein Metall, das zur Kathode geht, und in ein elektroneg. zusammengesetztes Radical, das an der Anode ausgeschieden wird. Ist diese ein stark pos. Metall, so vereinigt sich dieses mit dem Radical zu einem Salze, das in gleicher Weise zersetzt wird und daher das Metall der pos. Elektrode an die neg. führt. Ist aber die Anode schwach pos., so vereinigt sich das Radical mit dem Wasserstoff des gewöhnlich vorhandenen Wassers zu einer Säure, und Sauerstoff wird frei. Ist das ausgeschiedene Metall, das zur Kathode geht, sehr stark pos., so tritt es in das gewöhnlich vorhandene Wasser ein und bildet eine Basis, wodurch Wasserstoff frei wird; im anderen Falle scheidet sich das Metall regulinisch an der Kathode aus. Die gewöhnlichen Basen werden ebenfalls in Metall und Wasserstoff am neg. Pole und in Sauerstoff am pos. Pole zerlegt, da dieselben gemäß der modernen Chemie aus einem Metall, Wasserstoff und Sauerstoff bestehen. Diejenigen Wirkungen, welche nicht rein durch die Elektrolyse, sondern nach derselben durch die chemischen Eigenschaften der Jonen erzielt werden, nennt man *secundäre Actionen*; solche sind die Einwirkung der Jonen auf die Elektroden, am meisten des Anions auf die Anode, dann die Einwirkung der Jonen auf den Elektrolyten und endlich die Wirkung der Jonen auf einander.

Die Elektrolyse eines und desselben Stoffes ist der Stromstärke proportional; die Elektrolyse verschiedener Stoffe durch denselben Strom geschieht im Verhältnisse der Atomgewichte.

Dieses elektrolytische Gesetz wurde von Faraday aufgefunden, indem er in einen und denselben Stromkreis ein Voltameter und eine Zersetzungszelle einschaltete und dann die Menge der entstandenen Jonen mit der des entstandenen Knallgases verglich; bei gleichen Knallgasmengen waren immer Mengen der Jonen entstanden, die im Verhältnisse der Atomgewichte zu einander und zu dem Knallgase standen; zersetzte er z. B. Wasserstoffsäuren, so entstand für gleiche Knallgasmengen auch immer dasselbe Volumen Wasserstoff. Für gelöste Salze wurde das Gesetz seitdem von Daniell, Buff u. A. nachgewiesen.

Bei der Elektrolyse stark concentrirter Wasserstoffsäuren werden nur diese, nicht aber das Wasser zersetzt; man erhält daher von Salzsäure an der Kathode H, an der Anode nur Chlor, aber nur sehr wenig, weil dasselbe vom Wasser stark absorbirt wird. Um die stärksten pos. Metalle, wie Kalium, Natrium, Calcium aus ihren Chlorverbindungen abzuscheiden, schmilzt man sie in einem Tiegel von Bunsen'scher Kohle, der als Anode dient, und hält einen Eisendraht als Kathode in die geschmolzene Masse; das reducirte Metall setzt sich dann an den Eisendraht an; übrigens ist es Bunsen gelungen, diese Metalle auch aus concentrirten Lösungen der Haloidsalze auszuscheiden; beide Processe geschehen auch mit den Haloidsalzen der schweren Metalle. — Kupfervitriol $Cu.SO_4$ wird zersetzt in Cu und SO_4, Cu geht an den neg. Pol und SO_4 an den pos. Pol; findet es dort z. B. Cu, so entsteht neues Kupfervitriol, das abermals zersetzt wird, wodurch das Cu des pos. Poles an den neg. gelangt; findet SO_4 aber an der Anode Platin, so zerfällt es in SO_3 und O, wenn kein Wasser vorhanden ist; ist aber solches, wie gewöhnlich vorhanden, so entsteht H_2SO_4, Schwefelsäure, während O frei wird. Solche secundäre Actionen treten bei der Elektrolyse sehr häufig auf. — Natriumsulfat oder Glaubersalz ($Na_2.SO_4$) wird zersetzt in Na und SO_4; das Radical SO_4 wird an der Anode zu Schwefelsäure und Sauerstoff, das Metall Na vereinigt sich mit H und O des Wassers (H_2O) zu NaHO, Natron, wodurch 1 At. H

frei wird; es entstehen also an der Kathode Natron und Wasserstoff. Demnach wird das Salz scheinbar in seine Säure und in seine Basis zerlegt, was auch bei ähnlichen Salzen in ähnlicher Weise stattfindet. Man zeigt dies mittels einer U-förmigen Röhre, die mit der blaugefärbten Salzlösung gefüllt ist, und in welche Platinbleche als Elektroden eingeführt sind; die Seite der neg. Elektrode wird von der Basis grünlich, die der pos. Elektrode von der Säure roth gefärbt. Bei dem Versuche mit Glaubersalz entstehen den Atomgewichten proportionale Mengen H_2SO_4, O, NaHO und H durch denselben Strom, der nur 1 Atg. Wasser oder Chlorblei zersetzt; wenn man Glaubersalz als $Na_2O . SO_3$ ansieht nach der älteren chemischen Anschauung, so widerspricht die letzte Erscheinung dem elektrolytischen Gesetze; sie ist also eine Hauptstütze der modernen Chemie (57.). Die Bildung von Natron und Wasserstoff ist hier eine secundäre Action; dieselbe Action verhindert die Darstellung der Alkalimetalle durch Elektrolyse concentrirter Lösungen der Alkalien; elektrolysirt man z. B. Kalilauge KHO, so hat es den Anschein, als ob nur Wasser zersetzt würde, indem das an die Kathode gehende Kalium sich mit H und O des Wassers vereinigt zu KHO, Kali, so daß H an der Kathode frei wird. Besteht die Kathode aus Quecksilber, so erhält man Kaliumamalgam, aus welchem das Kalium durch Abdestilliren des Quecksilbers gewonnen werden kann; in derselben Weise kann man Natrium, wie auch die Metalle der alkalischen Erden durch Elektrolyse erhalten. Davys berühmte erste Elektrolysen der Alkalien (1807) ergaben ebenfalls nicht die reinen Metalle; er schmolz in einem als Anode dienenden Platinlöffel Kali oder Natron und tauchte in die flüssige Masse einen Platindraht als Kathode, an welcher sich das reducirte Metall sammelte, aber sofort verbrannte. Interessant sind die Elektrolysen der Ammoniaksalze, weil sie Berzelius zu der Annahme des Ammoniums (NH_4) führten. Alle diese Salze erzeugen an der Kathode NH_4, das sich gewöhnlich in Ammoniak und H zersetzt; besteht aber die Kathode aus Quecksilber, so entsteht Ammoniumamalgam, das durch Erhitzen zerfällt in Ammoniak, Quecksilber und H. Bei der Elektrolyse von Salmiak zersetzt das an die Anode gehende Chlor den Salmiak und entwickelt zuerst Stickstoff und dann Chlorstickstoff; ist die Salmiaklösung mit einer dünnen Schicht von Terpentinöl bedeckt, so explodiren die aufsteigenden Chlorstickstofftröpfchen bei der Berührung des Oeles.

Andere secundäre Actionen sind: Bei der Elektrolyse von Goldchlorid und Platinchlorid vereinigt sich das an die Anode gehende Chlor mit derselben, selbst wenn die Anode Platin oder Gold ist (Auflösung der Anode durch das Anion). Die Elektrolyse von Zinnchlorür geschieht deßhalb mit einer Anode von Graphit; dann vereinigt sich das Chlor mit dem Zinnchlorür zu Zinnchlorid, das in Dampfform entweicht (Wirkung des Anions auf den Elektrolyten). Eine gleiche Wirkung ist die Entstehung der Superoxyde an der Anode. Wenn man Bleizuckerlösung elektrolysirt, so entstehen an der Kathode Bleikrystalle, an der Anode vereinigt sich der Sauerstoff mit dem Bleioxyd zu Bleisuperoxyd. Ebenso entstehen Nickelsuperoxyd, Silbersuperoxyd u. a. — Wenn man Kupferchlorid elektrolysirt, so vereinigt sich das an die Kathode gehende Kupfer mit dem Kupferchlorid zu Kupferchlorür. Bei der Elektrolyse von Schwefelsäure entsteht an der Anode O, an der Kathode Schwefel, Schwefeldioxyd, Schwefelwasserstoff und wenig H (Wirkung des Kations auf den Elektrolyt).

Daß die secundären Actionen wirklich chemische Wirkungen der frei gewordenen Jonen und nicht elektrolytische Wirkungen sind, geht aus mehreren Umständen hervor, z. B. bei der Zerlegung von Glaubersalz in Schwefelsäure und O an der Anode und in Natron und H an der Kathode. Wäre die Entstehung von H und O eine elektrolytische Wirkung, so dürfte nicht eine äquivalente Menge von H und O entstehen, wie dies immer der Fall ist, sondern anfänglich gar keine und am Schlusse eine geringere zufällige Menge, weil bei der Zersetzung von concentrirten Lösungen das Wasser zuletzt elektrolysirt wird, eine Erscheinung, welche Hittorf damit erklärt, daß der Strom sich nach den Gesetzen der Zweigströme auf die Bestandtheile eines gemischten Elektrolyten nach ihrer Leitungsfähigkeit vertheile, wodurch auf das Wasser wegen seines großen Widerstandes nur ein kleiner Stromantheil komme, der zu sofortiger Zersetzung desselben nicht ausreiche. Dann müßte auch bei anderen ähnlichen Salzen eine gleiche Zerlegung eintreten, während z. B. bei der Elektrolyse von $Cu . SO_4$ wohl O, aber kein H entsteht. Der Hauptgrund liegt aber in dem elektrolytischen Gesetze, welchem die meisten secundären Actionen widersprechen würden, wenn man sie als elektrolytische Wirkungen auffassen wollte; so wäre z. B. in dem obigen Falle ein Atg. Salz und ein Atg. Wasser in der Zersetzungszelle elektrolysirt, während in dem Voltameter nur 1 Atg. Wasser zersetzt wird. Auch liegt noch ein Grund darin, daß selbst bei der Elektrolyse der alkalischen Erdsalze durch einen Strom von großer Dichte kein H entsteht, indem an dem dünnen Drahte der Kathode das sich anhäufende Metall dem Wasser nur wenig Berührung bietet und sich so vor Oxydation schützt.

514 **Wanderung der Jonen. Polarisationsstrom.** Untersucht man die Quantität der Jonen im Vergleiche zu der Concentration der Elektrolyten an beiden Polen, so zeigt sich eine Erscheinung, die man die Wanderung der Jonen nennt. Da nämlich an der Anode sich ein Atg. des Anions und an der Kathode 1 Atg. des Kations ausscheidet, so

könnte man sich denken, von der Anode sei von 1 Atg. des Elektrolyten ½ Kation entgegangen und dadurch ½ Anion frei geworden; ebenso sei von der Kathode ½ Atg. Anion fortgegangen und dadurch ½ Kation frei geworden; zu diesem ½ Kation geselle sich das ½ Kation, das von der Anode fortgegangen sei, und bilde so das Atg. Kation; und endlich sei das von der Kathode fortgegangene ½ Anion zu dem an der Anode frei gewordenen ½ Anion getreten und habe so das Atg. des Anions gebildet. Hätte der Vorgang wirklich in dieser Weise stattgefunden, so wäre an der Anode wie an der Kathode von je 1 Atg. des Elektrolyten ½ Atg. zurückgeblieben, die Concentration der Lösung müßte also nach wie vor an beiden Elektroden gleich sein. Dies ist nun aber nicht der Fall, folglich kann auch der Vorgang nicht in der angeführten Weise stattgefunden haben; es muß in der einen Richtung mehr als ½ z. B. ⅔ Jon fortgegangen, also an derselben Elektrode ⅔ des anderen Jons freigeworden sein, so daß sich von der anderen Elektrode her nur ⅓ dieses anderen Jons in der entgegengesetzten Richtung herbei zu bewegen brauchte, um das ganze Atg. des gebliebenen Jons zu bilden; deßhalb wurde auch von dem ersten Jon an der anderen Elektrode nur ⅓ frei, das sich mit den von der ersten Elektrode hergekommenen ⅔ zu dem ganzen Atg. des ersten Jons vereinigte. So ist es z. B. bei Chlorbarium; es wandern ⅔ Atg. Chlor, aber nur ⅓ Barium; und in den meisten Fällen ist der Betrag des wandernden Anions größer als der des Kations.

Wenn man die Platinplatten eines Voltameters oder eines Wasserzersetzungsapparates rasch von der Batterie trennt und mit einem Galvanometer verbindet, so findet man, daß das Voltameter oder der Wasserzersetzungsapparat wie eine Kette wirken; sie erzeugen nämlich, wie 495. 7 entwickelt wurde, einen Polarisations- oder secundären Strom, der dem primären entgegengesetzt ist und diesen daher schwächt; durch diese Schwächung wurde man zuerst auf die Erscheinung aufmerksam. Man hielt die Schwächung für die Folge des Widerstandes der Flüssigkeit des Voltameters, mußte aber diese Ansicht aufgeben, als man den Widerstand bei Verdoppelung der flüssigen Schicht nicht verdoppelt, sondern nur wenig vergrößert fand; dann hielt man sie für die Folge eines vermutheten Uebergangswiderstandes an den Elektroden, indem man sich dachte, daß der Uebergang des Stromes aus einem festen in einen flüssigen Körper und umgekehrt einen Theil der Kraft verzehre. Als man endlich fand, daß die Entwickelung von O an der Kathode und von H an der Anode die Schwächung aufhebt, weil dann die den Polarisationsstrom erzeugenden Gasschichten zu Wasser werden, da war man überzeugt, daß die Polarisation die Ursache der Stromschwächung sei. Allerdings ist auch noch ein anderer Widerstand am Uebergange möglich, z. B. wenn sich eine Elektrode mit einer Oxydschicht bedeckt, oder wenn sich an den beiden Elektroden je eine Säure und eine Basis entwickeln, die ebenfalls als Elektromotoren einen Strom entwickeln; aber einen eigentlichen Uebergangswiderstand gab man vollständig auf, als man den Einfluß der Polarisation zu berechnen verstand und die Stromschwächung, wenn die eben genannten Widerstände beseitigt waren, jenem Einflusse gleich fand. Da der Polarisationsstrom sehr kurz ist, weil er selbst die ihn aufhebenden Gase entwickelt, so ist zu seinem Studium ein rasch wirkender Umschalter nöthig, mit welchem man den ursprünglichen Strom aus einem Kreise aus- und den Polarisationsstrom einschalten kann; dafür hat Poggendorff (1844) seine Wippe construirt, mittels welcher man die Umschaltungen so schnell vornehmen kann, daß der Polarisationsstrom einer Reihe von Voltametern, einer sogenannten Ladungssäule, sogar den Hauptstrom verstärken kann.

515 **Anwendungen der Elektrolyse.** a. Krystallisirte Metallausscheidungen. Bringt man in eine Metallsalzlösung ein anderes, positiveres Metall, so tritt dasselbe häufig substituirend in die Salzverbindung ein und scheidet dadurch an sich selbst kleine Theilchen des Salzmetalles aus; durch die Berührung bilden diese Metalle eine galvanische Kette, in welcher das ausgeschiedene Metall negativ wird, also die Kathode bildet; durch den el. Strom geht nun die Zersetzung des Salzes rasch weiter, und da sich das Salzmetall an die Kathode begibt, so setzt sich Theilchen an Theilchen zu allerlei Figuren zusammen, die man Metallvegetationen nennt.

Setzt man einen Zinkstab in Bleizuckerlösung, so bildet sich in dieser Weise der Bleibaum oder Saturnusbaum; durch einen Tropfen Quecksilber in Höllensteinlösung entsteht der Silber- oder Dianenbaum. Stellt man einen Zinkstab in Zinnchlorür, dem etwas Salzsäure zugesetzt wurde, so entsteht krystallinisches Zinn; noch schöner fällt dasselbe aus, wenn man in die Lösung die Platinelektroden einer Batterie bringt; wechselt man die Pole, so verschwinden die Krystallblättchen, tauchen aber bald an der anderen Elektrode auf. Hält man in eine Kupfervitriollösung eine blanke Messerklinge, so läuft dieselbe sofort roth an. — Aehnliche Erscheinungen sind: Taucht man Kupfer für sich allein in Salzwasser, so erhält es eine Oxydrinde; berührt man es aber mit einem Stücke Zink, so wird es neg., stößt also den ebenfalls neg. Sauerstoff ab, während sich das pos. gewordene Zink mit diesem

vereinigt. — Reines Zink ist für den Proceß der Wasserstoffbereitung unbrauchbar; gewöhnlich aber ist es durch Kohle verunreinigt, welche das Zink stark pos. macht, so daß es den neg. O anzieht und dadurch H frei macht; dasselbe geschieht, wenn man reines Zink mit einem mehr neg. Metall, Silber, Kupfer berührt. — Da Zink durch seine Berührung alle Metalle neg. macht, so reicht eine schwache Verzinkung aus, um Metalle vor der Oxydation zu schützen; dies benutzt man zum Schutze der kupfernen Schiffsbeschläge durch Zinküberzug (galvanisirtes Eisen). Eisen wird in Berührung mit Kupfer pos., rostet also dann leicht; ebenso schreitet das Rosten unaufhaltsam fort, wenn einmal ein Rostfleckchen vorhanden ist, weil Eisen ebenfalls in Berührung mit Rost pos. wird. — Die el. Eigenschaft des Eisens wird durch manche Einflüsse so verändert, daß es seine Stelle in der Spannungsreihe verliert, gegen Kupfer nicht mehr pos., sondern neg. ist; weil dieses Eisen auch nicht mehr auf Salpetersäure und Kupfervitriol zersetzend wirkt, so nennt man es auch passives Eisen. Die Passivität des Eisens wird hervorgerufen durch Eintauchen in conc. Salpetersäure, Jodsäure, Chlorsäure, Bromsäure, durch Glühen desselben an der Luft, und dadurch, daß man es als pos. Elektrode in einen Wasserzersetzungsapparat einführt; da alle diese Vornahmen das Eisen einer verschärften Sauerstoffwirkung aussetzen, und da Eisenoxydulоxyd Salpetersäure u. s. w. nicht angreift, so hält Faraday die Passivität des Eisens in einem dünnen, oft unmerklichen Ueberzuge desselben mit Eisenoxyduloxyd begründet.

b. Nobilis Farbenringe oder die Galvanochromie (1826). Wenn man eine blanke Metallfläche mit dem pos. Pole einer Kette verbindet, dann auf dieselbe eine Lösung von Bleizucker oder von Mangansulfat gießt, und in diese Lösung, ohne die Platte zu berühren, einen mit dem neg. Pole der Batterie in Verbindung stehenden Platindraht eintaucht, so bilden sich unter dem Drahtende regenbogenfarbige Ringe, welche die Reihenfolge der Newton'schen Farbenringe zeigen. 516

Diese Ringe entstehen dadurch, daß der an die pos. Elektrode gehende Sauerstoff sich mit dem Bleioxyd zu Bleisuperoxyd verbindet, und daß dieses sich in einer Rinde unter der Drahtspitze absetzt; da die Zersetzung von diesem Punkte aus gleichmäßig nach allen Seiten fortschreitet und die gebildete Rinde immer von neuen Rinden bedeckt wird, so nimmt die Dicke der Abscheidung gleichmäßig nach außen hin ab, zeigt also die Newton'schen Farbenringe für das durchgelassene Licht: gelb, violettroth, mattblau; weiß, gelb, rothviolett; grün, gelb, roth, blau, blaugrün. Nach Becquerel gibt besonders prachtvolle Farben folgendes Verfahren: Feingepulverte Bleiglätte wird in Kalilauge von 1,8 spec. G. gekocht; in die Flüssigkeit wird die Metallplatte als pos. Pol. einer Daniell'schen Batterie von 6 Ketten eingetaucht und ihr gegenüber der Platindraht des neg. Poles befestigt. Man benutzt diese Ausscheidung zur metallischen Färbung von metallischen Haushaltungsgegenständen, wie Tischglocken, Fidibusbechern u. s. w. — Die Farben entstehen auch schon, wenn man auf eine Silberplatte essigsaures oder schwefelsaures Kupfer gießt und sie mit der Spitze eines Zinkstabes in der Lösung berührt, weil dann schon durch diese Metalle und die Flüssigkeit der nöthige galvanische Strom entsteht.

c. Galvanische Vergoldung und Versilberung. Taucht man in eine Silber- oder Goldlösung die beiden Pole einer galv. Kette, und befestigt an den neg. Poldraht als Kathode metallische Gegenstände, an die Anode einen Silber- oder Goldstreifen, so wird die Lösung durch den el. Strom zersetzt, ihr Silber oder Gold wird auf den die Kathode bildenden Gegenständen niedergeschlagen, und das Silber oder Gold der Anode wird durch die Einwirkung des Anions aufgelöst und dient so zu erneuten Niederschlägen auf der Kathode, wodurch auf den Gegenständen sich ein Silber- oder Goldüberzug bildet. 517

Wäre der Niederschlag ein rein elektrolytischer, so würde sich das Silber krystallinisch absetzen, also keinen Ueberzug, sondern nur moosförmige, dendritische Figuren bilden; es wird daher der Niederschlag durch eine secundäre Action gebildet. Die hierzu dienlichen Versilberungs- und Vergoldungsflüssigkeiten sind sehr verschieden. Am häufigsten benutzt man Cyansilber (1 Th.), Cyankalium (10 Th.) und 100 Th. Wasser. Durch den el. Strom wird das Cyankalium in Kalium und Cyan zerlegt; das Kalium zersetzt dann das Cyansilber und bildet so einen cohärenten Ueberzug von Silber, während das frei werdende Cyan als Anion sich mit dem Silber an der Anode verbindet. Als Vergoldungsflüssigkeit wendet man eine Mischung von Goldchlorid mit Cyankalium an. Zum Platiniren dient eine Lösung von Platinsalmiak in Wasser. Kupfer, Silber, Bronze, Messing, Neusilber vergolden sich direct, Eisen, Stahl, Zink, Blei, Zinn müssen erst einen Kupfer- oder Silberüberzug erhalten, ehe sie in das Goldbad kommen. Uebrigens müssen alle Stoffe erst besonders für die Versilberung und Vergoldung präparirt, derochirt, d. i. von groben Un-

reinigkeiten befreit, dann decapirt, d. i. von den feinsten Oxydhäutchen gereinigt werden, wozu langwierige Arbeiten nöthig sind. Die bekannteste Werkstätte ist die von Christofle, dessen Verfahren von Elkington herrührt. Die galvanischen Metallüberzüge, so auch Verkupferung, Vernickelung u. s. w. gewinnen in Metallwaarenfabriken aller Art immer mehr Ausbreitung und dies besonders durch die Anwendung der magnet-elektrischen Maschinen. So hat die Anstalt von Wolhill in Hamburg eine Gramme'sche Maschine im Gebrauch, welche in jeder Stunde 10kg Silber niederschlägt.

518 d. Die **Galvanoplastik** (Jacobi und Spencer 1838) ist die Nachbildung von plastischen Bildwerken durch einen el. Niederschlag von Kupfer auf denselben. Als Elektrolyt wird Kupfervitriollösung benutzt, der abzubildende Gegenstand ist an dem neg. Poldrahte befestigt, bildet also die Kathode, auf der sich das Kupfer niederschlägt, und von welcher, wenn sie ein wenig befettet ist, der hinreichend stark gewordene Niederschlag sich loslösen läßt; die Abbildung ist in Vertiefungen und Erhabenheiten umgekehrt wie der Gegenstand; soll sie demselben gleich sein, so muß zuvor eine Matrize von demselben angefertigt werden, was entweder ebenfalls galvanoplastisch oder durch Gypsabguß oder Guttapercha-Abdruck geschieht. Die Anode wird von einer Platte aus Kupfer gebildet, das sich mit dem abgeschiedenen Anion SO_4 zu Kupfervitriol verbindet und so die Lösung constant erhält.

Für kleinere Abbildungen kann die Zersetzungszelle zugleich als galv. Kette dienen, in welcher die Form das neg. und eine eingetauchte Zinkplatte das pos. Metall bildet. In ein irdenes Gefäß wird die Kupfervitriollösung (gesättigte Lösung mit 1/4 Vol. Wasser und etwas Schwefelsäure) gefüllt; in dasselbe taucht ein unten mit Blase verschlossener Glascylinder oder eine Thonzelle, die verdünnte Schwefelsäure enthält und von einem mit dem Gefäße verbundenen Ringarme oder einem durchbohrten, in die Lösung eingesetzten Brette gehalten wird, auf dem Vitriolkrystalle liegen. In die Schwefelsäure taucht ein amalgamirter Zinkstreifen, der durch einen Kupferdraht mit der unter dem Brette, auf dem Boden des Gefäßes liegenden Form verbunden ist; dieser Kupferdraht muß, so weit er in die Flüssigkeit taucht, durch einen nicht leitenden Ueberzug isolirt sein, ebenso alle Theile der Form, die sich nicht abbilden sollen. Für kleine Matrizen benutzt man am besten Guttapercha, die man für einige Augenblicke in heißes Wasser legt, wodurch sie weich wird, und sie dann auf die Patrize drückt. Die so erhaltene Matrize wird mittels eines feinen Pinsels an den abzubildenden Stellen dicht mit Graphitpulver oder Bronzepulver bestäubt, wodurch gleichzeitig die Ablösbarkeit der Nachbildung befördert wird. Auch eine Mischung von Wachs und Gyps oder von Wachs und Stearin kann zur Matrize benutzt werden. — Bei galv. Bildwerken im Großen werden einzelne Theile des Modells in Gyps oder einer passenden Mischung abgegossen, diese Theile werden galv. nachgebildet und dann zusammengesetzt. Es entstand das Gutenbergdenkmal in Frankfurt (L. v. Kreß) und eine Nachbildung der in Rom stehenden Trajanssäule (Oudry zu Auteuil bei Paris im Auftrage von Napoleon III.). In diesem Etablissement werden eiserne Candelaber, Springbrunnen u. dgl. mit einem galvanoplastischen Kupferüberzuge versehen. Die Firma Christofle, welche bis 1875 schon 12 magnet-elektrische Maschinen von Gramme bezogen hatte, fertigt galvanoplastisch 4—5m hohe Bildsäulen, welche auf den Weltausstellungen als Wunderwerke angestaunt werden. Eine sehr nützliche Anwendung hat die Galvanoplastik zur Nachbildung von Kupferstichplatten, zu Clichés von Holzschnitten u. s. w.; die ursprünglichen Bildwerke würden durch die häufigen Abdrücke rasch abgenutzt werden und daher bald schlechte Bilder liefern; benutzt man sie aber nur zur Herstellung von galvanoplastischen Abdrücken, die dann zum Drucken gebraucht werden, so kann das ursprüngliche Bildwerk sehr lange dienen. Von diesem Mittel, kostbare Originalplatten zu schonen, macht man Anwendung besonders in Landkartenfabriken, Druckereien u. s. w.; die Schriftgießer fertigen von gegossenen Buchstaben, Vignetten u. s. w., galvanoplastische Matrizen, um in denselben den betreffenden Buchstaben neu zu gießen. Die Stereotypplatten werden auf der Druckseite galvanoplastisch mit einer dünnen Kupferschicht versehen, welche ihre Dauerhaftigkeit sehr erhöht; ebenso die Rückseite der Silberglasspiegel. Von der außerordentlichen Genauigkeit, mit welcher das Kupfer die Formen wiedergibt, erhält man einen Beweis durch die galvanoplastische Nachbildung einer Daguerreotypie, welche diese ganz getreu darstellt. Nach Kobells Verfahren kann man galvanoplastisch Platten für Abdrücke in Tuschmanier herstellen; das Bild wird auf einer versilberten Kupferplatte mit einer Farbe aus Ocker und einer Wachslösung in Terpentin gemalt; diese Platte wird dann galvanoplastisch nachgebildet und der Nachguß zu Papierabdrücken benutzt. Dieses Verfahren nennt man **Galvanographie**. Auch eine galvanische Aetzmanier hat Osann ersonnen, die **Galvanokaustik** genannt wird.

e. Die galvanische Metallurgie, d. i. die Gewinnung von Metallen aus ihren Erzen oder aus anderen Verbindungen, die Metallscheidung u. s. w. scheint erst jetzt Eingang zu finden; denn nach W. Siemens (1881) „benutzt die Hüttenindustrie bereits dynamoelektrische Maschinen, welche täglich Tonnen Kupfer galvanisch in chemisch reinem Zustande niederschlagen und es dabei von den Edelmetallen, die es enthält, trennen.“

5. Die mechanische Wirkung des el. Stromes (Quincke 1863). Bringt man in eine wenig geneigte enge Glasröhre zwischen zwei eingeschmolzene Platindrähte einen kleinen Flüssigkeitsfaden und läßt dann den el. Strom mittels der 2 Platindrähte durch denselben gehen, so wird derselbe, wenn der pos. Strom aufwärts geht, mit dem pos. Strome fortgeführt und demnach ein wenig gehoben; nur eine gewisse Sorte von Alkohol und Terpentinöl gehen unter Umständen mit dem neg. Strome. Die Steighöhe zeigt sich proportional der Stromstärke, proportional dem Querschnitte der Röhre, also umgekehrt proportional dem Leitungswiderstande der Flüssigkeit; bei gut leitenden Flüssigkeiten z. B. bei Salzlösungen ist sie verschwindend klein. Sind in der Flüssigkeit kleine Theilchen, z. B. Stärkemehlkörnchen suspendirt, so bewegen sie sich bei starkem Strome in der Richtung der neg. El., bei schwachem Strome oder am Rande in pos., in der Mitte in neg. Richtung. Quincke erklärte diese Bewegungen dadurch, daß in dem reinen Wasserfaden die Theilchen pos. el., und deßhalb von dem pos. Strome fortgeführt würden, daß dagegen suspendirte Theilchen durch Contact mit dem Wasser neg. El. annähmen, und daher von dem neg. Strome fortgestoßen würden. Eine ähnliche Erscheinung ist die el. Endosmose, d. i. das Fortströmen einer Flüssigkeit durch eine poröse Scheidewand, wenn ein el. Strom durch die Flüssigkeit geht; da die Gesetze dieser Strömung ganz mit denen von Quinckes Rohr übereinstimmen, so ist diese Erscheinung nichts anderes, als das Fortströmen durch viele Capillarröhren. Eine umgekehrte Erscheinung ist das Entstehen eines el. Stromes, wenn reines Wasser durch eine poröse Scheidewand geht; diese von Quincke (1858) entdeckten Diaphragmenströme erklärt Wüllner als eine Folge des Contactes der Flüssigkeit mit der porösen Scheidewand. Nach Zöllners Versuchen (1872) sind alle strömenden Bewegungen in Flüssigkeiten, besonders wenn dieselben theilweise mit starren Körpern in Berührung sind, von el. Strömen (Strömungsströmen) begleitet, die vorwiegend die Richtung der strömenden Flüssigkeit zu haben scheinen. Andere mechanische Wirkungen des Stromes sind das Abnehmen der Festigkeit und des Leitungswiderstandes eines Kupferdrahtes, der lange als Stromleiter gedient hat, sowie das Abnehmen der Festigkeit und der Elasticität während des Stromdurchganges, welche jedoch nach Edlund (1867) und Streintz (1873) nur der entwickelten Wärme zu verdanken sind, während die schon von Wertheim bemerkte Verlängerung der Drähte nach denselben Forschern die der Wärme übersteigt.

4. Wirkungen des elektrischen Stromes.

b. In die Ferne.

Die Fernewirkungen des el. Stromes sind: 1. dynamische Wirkungen, 2. magn. Wirkungen, 3. el. oder Inductionswirkungen. Die dynamischen d. i. bewegenden Wirkungen bestehen darin, daß el. Ströme auf einander und auf den Magnet einen bewegenden Einfluß ausüben; diesen Theil der Lehre vom Galvanismus nennt man auch die Elektrodynamik; dieselbe enthält die anziehende und abstoßende Wirkung el. Ströme auf einander, die Wirkung von Magneten auf el. Ströme und die Ampère'sche Theorie des Magnetismus.

1. **Die Elektrodynamik.** a. Anziehung und Abstoßung el. Ströme gegen einander (Ampère 1820). Für el. Ströme bestehen vier Regeln, analog den Grundgesetzen des Magnetismus und der Elektricität: 1. Parallele Ströme ziehen einander an, wenn sie gleiche Richtung haben. 2. Parallele Ströme stoßen einander ab, wenn sie entgegengesetzte Richtung haben. 3. Nicht parallele Ströme ziehen einander an, wenn sie gleiche Richtung haben, d. i. wenn sie nach einem Punkte hin oder von einem Punkte weg laufen. 4. Nicht parallele Ströme stoßen einander ab, wenn sie entgegengesetzte Richtung haben,

d. i. wenn der eine nach einem Punkte hingeht, von welchem der andere weg geht.

Zum Nachweise dieser Regeln dient das Ampère'sche Gestell (Fig. 310). Die beiden Klemmschrauben c und o für die Poldrähte einer Batterie befinden sich an dem Fuße zweier auf einer Bodenplatte stehenden aber von einander isolirten Metallstäbe d und f, die sich oben wagrecht umbiegen und an ihren Enden Quecksilbernäpfe g und h tragen. Ist nun ein Draht in die Form eines Rechteckes klmn so gebogen, daß seine beiden Enden o und r in diese Quecksilbernäpfe eingehängt werden können, so geht durch dieses drehbare Rechteck ein el. Str., der mittels eines in einen der Poldrähte eingeschalteten Stromwechslers nach Belieben geschlossen, geöffnet und umgekehrt werden kann. Die Poldrähte einer zweiten Batterie gehen an die Klemmschrauben eines zweiten, nicht drehbaren, aber auch nicht fest aufgestellten, sondern leicht handlich in alle Lagen zu bringenden Drahtrechteckes, welches demnach ebenfalls von einem el. Strome durchflossen ist. Da leicht festgestellt werden kann, in welcher Richtung der pos. Strom in jeder Seite der beiden Rechtecke sich bewegt, so kann auch leicht eine Seite des festen Rechteckes parallel zu einer Seite des drehbaren Rechteckes in einiger Entfernung von dieser so aufgestellt werden, daß der Strom in beiden gleiche Richtung hat; dann nimmt das letztere Rechteck eine solche Drehung an, daß die parallelen Seiten so nahe als möglich beisammen stehen, wodurch die erste Regel nachgewiesen ist, was man indeß noch vielfältig verändert vornehmen kann. Wechselt man den Strom, wenn die beiden parallelen Drähte in größter Nähe stabil beisammen stehen, so dreht sich plötzlich das drehbare Rechteck so, daß die beiden in Betracht gezogenen Seiten sich soweit als möglich von einander entfernen, womit die Regel 2 nachgewiesen ist. Auch hier läßt sich der Nachweis mannigfaltig verändern, besonders wenn man das zweite Rechteck in die Hand nimmt und mit einer Seite desselben eine der drehbaren verfolgt. Noch deutlicher werden die Versuche, wenn man statt des drehbaren Rechteckes einen drehbaren astatischen Leiter in die Quecksilbernäpfe hängt, weil dieser nicht wie ein einfaches Rechteck durch den Erdmagnetismus in einer bestimmten Lage festgehalten wird. Leicht sind auch die Regeln 3 und 4 nachzuweisen, da man ja das handliche Rechteck in jeder beliebigen Lage festhalten, also auch so stellen kann, daß es mit einer Seite des drehbaren Rechteckes einen beliebigen Winkel macht, und daß die Ströme beide nach dem Scheitel dieses Winkels hin, oder beide von dem Scheitel weg, oder auch theils nach demselben hin, theils von ihm weglaufen. Für die Anziehung gleichgerichteter paralleler Ströme gibt es mehrere Apparate; so Buffs Bandspirale, die auch zum Nachweise der Abstoßung dienen kann; von zwei mit einem isolirenden Stoffe überzogenen Streifen von Kupferblech ist jeder zu einer Spirale zusammengewunden und mit den freien Enden so aufgehängt, daß leicht ein Strom durchgeleitet werden kann und daß die zwei Spiralscheiben sich in nicht großer Entf. von einander befinden. Dann Petrinas Spirale, die aus Kupferdraht, zu einer schraubenartigen Spirale gewunden, besteht; das eine Ende ist in einem Messingständer, der die eine Klemme trägt, befestigt, das andere Ende taucht in ein Quecksilbernäpfchen, das die zweite Klemme trägt. Da die Windungen parallel sind, so ziehen sie einander an, wodurch das zweite Ende aus dem Quecks. gehoben und hiermit der Strom geöffnet wird; hierdurch hört die Anziehung auf, die Windungen entfernen sich von einander, das Ende taucht wieder ein und der Strom schließt sich wieder; es ist leicht ersichtlich, daß durch diese selbstthätige Wechselwirkung die Spirale in eine abwechselnd zusammenziehende und ausdehnende Bewegung geräth.

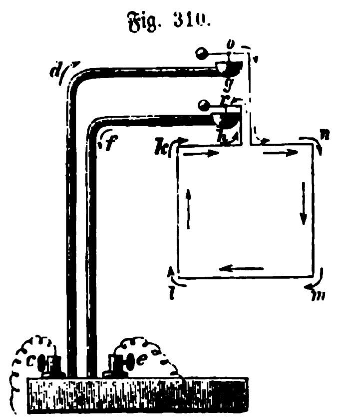


Fig. 310.

Die Anziehung und Abstoßung der Ströme ist proportional dem Product der Intensitäten der beiden Ströme und dem Product der auf einander wirkenden Stromlängen, sowie umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. (Elektrodynamisches Grundgesetz f. 81. und 533.).

Dieses Gesetz wurde von Weber (1846) mittels des Elektrodynamometers nachgewiesen. Dieses besteht aus einer Bifilarrolle, d. i. einer an den 2 Leitungsdrähten aufgehängten Spule, um welche der übersponnene Leitungsdraht Tausendemal herumgewunden ist, und über welcher der Ablesungsspiegel befestigt ist, und aus der feststehenden Multiplicatorrolle, einer Spule, die ebenfalls Tausende von Drahtwindungen trägt. Dem App. gegenüber steht, wie bei jeder Spiegelablesung ein Fernrohr mit Fadenkreuz und Scala, die man in dem Spiegel sieht. Aus den 4 Regeln ergeben sich folgende wichtige Folgerungen:

1. **Gekrenzte Ströme suchen sich parallel zu stellen**; denn laufen (Fig. 311) in dem Winkel I der Kreuzung die beiden Ströme nach dem Scheitel hin, so laufen sie in dem Scheitelwinkel III von demselben weg; also wirken die Ströme nach Regel 3 dahin, die Schenkel dieser Winkel einander zu nähern, die Winkel = 0 zu machen. In den 2 anderen Winkeln II und IV läuft in einem Schenkel der Strom zum Scheitel, im anderen von demselben weg; also wirken die Ströme nach Regel 4 dahin, die beiden Schenkel von einander zu entfernen, diese Winkel also = 180°, die ersten Winkel ebenfalls = 0 zu machen. An Ampères Gestell ist dieser Satz leicht nachzuweisen. 2. **Hinter einander liegende Theile eines und desselben Stromes stoßen einander ab**; denn diese Theile treffen sich in einem Punkte, nach welchem der eine Theil hin, von welchem der andere aber wegläuft. Nachgewiesen wird dieser Satz mittels **Ampères Bügel**. Ein Holztrog ist durch eine Glaswand in zwei Abtheilungen getheilt, die mit Queckſ. gefüllt sind, in das die 2 Poldrähte tauchen und auf dem ein Bügel von Eisendraht schwimmt; beim Schließen des Stromes bewegt sich derselbe von einem Ende des Apparates zum anderen. 3. **Geht ein begrenzter Strom zu einem unbegrenzten hin oder von demselben weg, so wird der Stromleiter längs desselben fortbewegt**, und zwar im ersten Falle gegen, im zweiten mit der Stromrichtung. Denn jedes Element des ersten Stromes ab (Fig. 312) wird, wenn er nach dem zweiten hingeht, von jedem Element des zweiten cm, das nach dem Convergenzpunkte hingerichtet ist, angezogen, also wird der erste Strom von der einen Seite des zweiten angezogen, und von der anderen dm abgestoßen, muß sich also nach der ersten Seite hinbewegen. Zum Nachweise dient ein **elektrodynamischer Rotationsapparat**. In dem Mittelpunkte einer mit Queckſ. gefüllten Kreisrinne steht eine Säule, die oben mit einem Quecksilbernäpfchen endigt; auf diesem schwebt mittels einer Spitze ein zweimal rechtwinklig umgebogener Kupferdraht, dessen Enden in die Rinne tauchen. Der Strom geht von einer Klemme durch einen mehrmals um die Rinne gewundenen Kupferdraht, dann in das Queckſ. über den schwebenden Draht zu demselben zurück zu der anderen Klemme. Der umwindende Kupferdraht bildet den unbegrenzten, der schwebende den begrenzten Strom, der sich längs des ersteren fortbewegen und daher um die Säule rotiren muß.

Fig. 311.

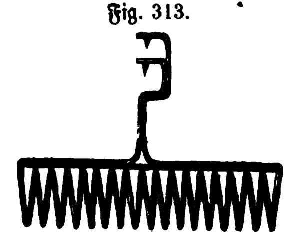
a b c d e f m I II III IV

Fig. 312.

a b c d m

4. Zwei Solenoide, d. i. schraubenartig gewundene Drahtspiralen (Fig, 313) stoßen sich an den 2 Enden ab, in denen die Ströme beide die Richtung der Uhrzeiger oder beide die entgegengesetzte Richtung haben, sie ziehen sich aber an zwei Enden an, wenn in dem einen Strome die Uhrzeigerrichtung, im anderen die entgegengesetzte herrscht.

Fig. 313.



Denn werden 2 Enden der ersten Art einander parallel gegenüber gestellt, so sind die parallelen Ströme einander entgegengesetzt wie an zwei Uhren, deren Zifferblätter einander parallel gegenüber stehen, die Zeiger entgegengesetzt gerichtete Kreise beschreiben; folglich müssen sich jene Enden einander abstoßen. Dasselbe findet aber auch statt, wenn diese Enden, die man wohl gleichnamig nennen kann, neben einander liegen (Fig. 314), weil alsdann die einander nahe stehenden Stromtheile bei i entgegengesetzte Richtung haben, gerade so wie an zwei neben einander stehenden Zifferblättern in den zwei benachbarten Halbkreisen die Bewegung der Zeiger entgegengesetzt ist. Die Anziehung von 2 Enden mit entgegengesetzter Stromkreisrichtung ersieht man leicht aus Fig. 315, da die einander nahe liegenden Stromtheile bei i gleiche Richtung haben. Die Erscheinungen können leicht an dem Ampère'schen Gestelle mittels eines drehbar aufgehängten und mittels eines festen, aber handlichen Solenoides nachgewiesen werden. Nennt man Enden mit gleichen Stromdrehrichtungen gleichnamig, und solche mit ungleichen Drehrichtungen ungleichnamig, so läßt sich der Satz kurz so aussprechen: **Gleichnamige Solenoidenden stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an.** Da dieses Solenoidengesetz mit dem Gesetze der Magnetpole übereinstimmt, so

liegt es nahe, die Einwirkung von Magneten auf Solenide und andere Stromformen näher zu untersuchen, und da die Erde der größte Magnet ist, zuerst die Wirkung der Erde auf bewegliche Stromleiter zu betrachten.

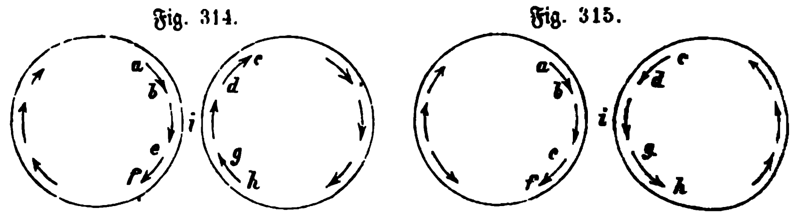


Fig. 314. Fig. 315.

521 b. Die Wirkung von Magneten auf elektrische Ströme. Ein auf dem Ampère'schen Gestelle aufgehängter rechteckiger oder kreisförmiger, von einem Strome durchflossener Stromdrahtleiter stellt sich senkrecht zu dem magnetischen Meridian, also ostwestlich, und zwar so, daß der positive Strom in der unteren Windung von Osten nach Westen fließt, oder daß in dem ganzen Leiter, von Süden betrachtet, der positive Strom in der Richtung der Uhrzeiger kreist.

Den einfachsten Versuch bietet die schwimmende Batterie von Delarive, bestehend aus einem großen Korkstücke, in welches eine Kupfer- und eine Zinkplatte eingesetzt sind, deren obere aus dem Korke herausragende Enden durch mehrere kreisförmige Kupferdrahtwindungen verbunden sind. Setzt man den Kork in Wasser, so entsteht ein Strom in dem Drahte, und der Draht stellt sich ostwestlich, senkrecht zu dem magnetischen Meridian. Weil demnach ein einfacher drehbarer Leitungsdraht in seiner ostwestlichen Stellung durch die Erdkraft festgehalten wird, so sind solche Drähte bei den Versuchen am Ampère'schen Gestelle nicht so leicht beweglich, als solche Drähte, die man von der Erde unabhängig gemacht hat, und die man astatische Leitungsdrähte nennt. Ein solcher wird z. B. in Rechteckform erhalten, wenn man die untere Seite schon in der Mitte wieder aufwärts biegt bis zu dem oberen ersten Knie, sie dann wagrecht in gleicher Länge weiter führt, dann abwärts biegt, dann unten zu der Mitte hingehen läßt und da abermals aufwärts biegt bis unter die erste Spitze, wo das umgebogene zweite Ende des Drahtes die zweite Spitze bildet. — Mehrere kreisförmige Leitungsdrähte parallel hinter einander an einem gemeinsamen leitenden Halter befestigt, stellen sich sämmtlich ostwestlich, die ganze Reihe daher in die Richtung des Meridians.

Ein horizontal drehbares Solenoid stellt sich mit seiner Achse in den magnetischen Meridian des Ortes, das eine Ende nach Norden, das andere nach Süden gerichtet. Nennt man das erste den Nordpol, das letzte den Südpol, so kreisen am Südpole die Ströme wie die Uhrzeiger, am Nordpole entgegengesetzt wie die Uhrzeiger. Ein horizontal drehbares Solenoid stellt sich also wie eine Declinationsnadel; kann es sich auch in verticaler Richtung drehen, so senkt sich der Nordpol nach unten, es stellt sich wie eine Inclinationsnadel. Wie nun ein Stromleiter und ein Solenoid von dem Magnet Erde eine Richtkraft erfahren, so werden sie auch von jedem anderen Magnet abgelenkt und zwar so, daß die Nordpole eines Magnetes und eines Solenoides, sowie auch die Südpole eines Magnetes und eines Solenoides einander abstoßen, daß dagegen ein Pol eines Magnetes und der ungleichnamige eines Solenoides einander anziehen. Ganz dasselbe findet auch für eine einzige Windung statt, die man als ein sehr kurzes Solenoid auffassen kann; auch diese wird von einem Magnetpole auf der einen Seite angezogen, auf der anderen abgestoßen.

Besonders deutlich werden alle diese Erscheinungen am Ampère'schen Gestelle bei eingeschaltetem Stromwechsler, weil sie sich bei jeder Umkehrung des Stromes ebenfalls umkehren: z. B. eine Drahtwindung und ein Solenoid drehen sich ganz um, nehmen die entgegengesetzte Stellung beim Stromwechsel ein; ein Solenoidpol, der eben noch von dem Nordpole eines Magnetes angezogen wurde, wird nach dem Stromwechsel von demselben abgestoßen; ein Solenoid erfährt also durch den Stromwechsel auch eine Vertauschung der Pole. — Die große Uebereinstimmung zwischen Magneten und Solenoiden führte zu

522 c. Ampères Theorie des Magnetismus (Ampère 1826, Weber 1846). Die letzten Abschnitte ergeben, daß Solenoide auf einander wirken wie Magnete; die Wirkung ist aber nicht blos der Art, sondern auch dem Gesetze nach dieselbe, denn sie

ist wie die Wirkung zweier Magnetpole dem Product der Intensitäten direct und dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional. Außerdem wirken Magnete auf Solenoide wie auf Magnete, und zwar ebenfalls sowohl der Art als auch dem Gesetze nach; und endlich ist schon aus früheren Betrachtungen bekannt, daß Drahtwindungen, also auch Solenoide auf Magnetnadeln wirken wie Magnete. Demnach haben die Solenoide so große Uebereinstimmung mit Magneten, daß Ampère zu der Folgerung veranlaßt wurde, die Magnete seien nichts anderes als Solenoide: der **Magnetismus ist ein Parallelismus elektrischer Kreisströme.** Indessen konnte Ampère doch nicht annehmen, daß ein Magnetstab als Ganzes von großen el. Strömen umkreist sei; denn ein großer Magnet läßt sich bekanntlich in unzählige kleine aber vollständige Magnete zerlegen, während ein Solenoid sich nur in kleine Drahtstücke, nicht aber in kleine Solenoide zerlegen läßt. Außerdem hat ein Solenoid seine Pole an den Enden, ein Magnet aber etwas abwärts von den Enden nach der Mitte zu; ein Solenoid wirkt nur an den Endflächen, nicht aber an den Seiten, während ein Magnet auch an den Seiten eine nach der Mitte hin abnehmende Wirkung besitzt. Diese Unterschiede gaben Ampères Theorie des Magnetismus folgende Gestalt: Ein Magnet besteht aus Molekularmagneten, deren Magnetismus darin seinen Grund hat, daß sie von parallelen el. Strömen, sogenannten **Elementarströmen**, umkreist sind. So lange die Elementarströme der verschiedenen Molekularmagnete noch nicht parallel und gleich gerichtet sind, so lange ist der Körper noch kein Magnet; sind aber diese Elementarströme durch Drehung der Molekularmagnete einander parallel und gleich gerichtet, so ist der Körper ein Magnet; sein Südpol liegt an dem Ende, wo diese Ströme die Richtung der Uhrzeiger haben, der Nordpol an dem anderen Ende. Da demnach in einem Magnet die hinter einander liegenden Molekularmagnete lange linienförmige Solenoide bilden, die ihren Zusammenhalt durch die Anziehung der parallelen Ströme erhalten, sich aber an ihren gleichnamigen Enden einander abstoßen, so werden jene Linien an den Enden eines Stabes nach außen gekrümmt, wodurch ein Theil ihrer Pole von den Stirnflächen des Magnetstabes an die Seitenflächen hingedreht wird; hierdurch erklärt sich die Verschiebung der Magnetpole von den Enden weg, die allmälige Abnahme der magnetischen Anziehung von den Polen nach der Mitte zu, die Indifferenzzone, und die durch van Rees gefundene stärkere Polarität der mittleren Schichten des Magnetes.

Die anziehende und abstoßende Wirkung zweier M. ist demnach nichts anderes als die anziehende Wirkung gleich gerichteter und die abstoßende Wirkung entgegengesetzt gerichteter Ströme. An einer Stirnfläche eines M. haben die Elementarströme der Stirnflächen sämmtlicher Molekularm. gleiche Richtung, wirken daher alle in demselben Sinne nach außen wie eine einzige große Solenoidwindung, und wirken demnach auf andere Magnetstirnflächen wie zwei Solenoidenden auf einander; und da deren anziehende und abstoßende Wirkung aus der Anziehung und Abstoßung der el. Ströme hervorgeht, so ist auch die der Magnetpole auf diese Eigenschaft der el. Ströme zurückgeführt. Zwei frei bewegliche M. wirken demgemäß so auf einander, daß die in ihnen supponirten Ströme parallel werden; leicht ist dies aus den Fig. 316—318 zu ersehen, in welchen bei A überall ungleichnamige Pole mit gleich gerichteten Strömen und bei B gleichnamige Pole mit entgegengesetzten Strömen auf einander wirken, und welche alle denkbaren Stellungen von M. gegeneinander darstellen. Ein fester M. hat auf einen beweglichen die Wirkung, dessen gleichgerichtete Ströme so nahe und so parallel als möglich zu stellen. — Da man jede magn. Wirkung auf Ströme zurückzuführen sucht, so erklärt man auch die magn. Wirkung der Erde durch el. Ströme, die von Osten nach Westen etwa gleichlaufend mit dem magn. Aequator die Erde umkreisen. Demgemäß

Fig. 316.

muß eine frei aufgehängte Stromwindung sich so drehen, daß in ihrer unteren Seite der Strom ebenfalls von Osten nach Westen geht; denn der Erdstrom wirkt zwar, da er von der unteren und der oberen Seite nahe gleich weit entfernt ist, auf diese beiden Ströme in gleicher aber entgegengesetzter Stärke, wodurch diese Wirkung sich aufhebt. Er ertheilt aber nach dem Satze über begrenzte und unbegrenzte Ströme dem aufsteigenden Strome eine Bewegung nach Westen und dem absteigenden eine solche nach Osten, wodurch die Windung westöstlich gestellt wird, und zwar so, daß der Strom unten von Osten nach Westen geht. Verstärkt tritt diese Wirkung der Erdströme bei Solenoiden und demnach auch bei Magneten auf; sie stellen ihre einzelnen Windungen westöstlich und daher sich selbst nordsüdlich. Die Ursache der Erströme kann vielleicht in der westöstlich wandernden Berührungsstelle der kälteren Nachthälfte mit der wärmeren Tageshälfte der Erde gesucht werden, ebenso wie die Variationen des Erdmagnetismus sich dann durch Wärmeänderungen der Erde erklären; nach Zöllner sind sie Strömungsströme des feurig-flüssigen Erdinnern (s. 591.).

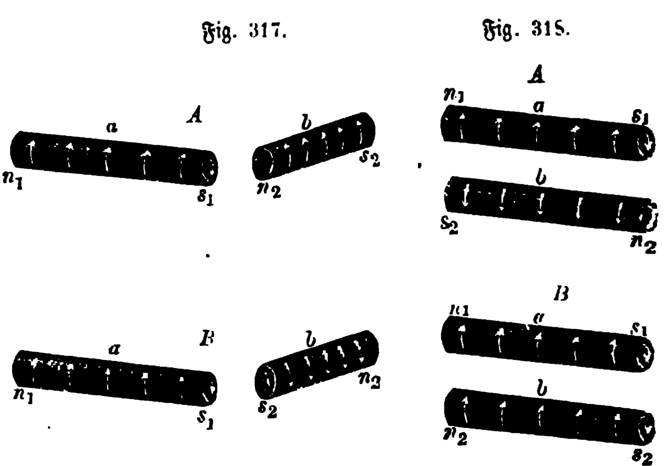


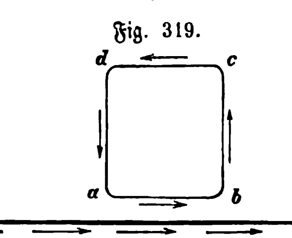
Fig. 317. Fig. 318.

523 **2. Die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes** ist eine zweifache: er lenkt Magnetnadeln ab (Oersteds Gesetz und Ampères Schwimmerregel) und wandelt Eisen in einen Magnet um (Elektromagnetismus).

a. Oersteds Gesetz und Ampères Schwimmerregel, sowie die auf ihnen beruhenden Instrumente wurden schon in 498. betrachtet.

Hier ist nur noch die Erklärung dieser Erscheinung nach Ampères Theorie anzugeben. Da eine Magnetnadel als ein Solenoid betrachtet werden kann, in welchem an der Stelle des Nordpoles (Fig. 319) die Ströme entgegengesetzt wie die Uhrzeiger kreisen, so ist zunächst die Wirkung eines Stromes st auf eine Stromwindung abcd ins Auge zu fassen, deren dem Strome zu- und abgewendete Seite nicht gleich weit von einander entfernt sind, wie es für den Erdstrom angenommen werden mußte; die Wirkung auf die zugewendete Seite ab ist dann stärker als auf die abgewendete dc; folglich muß die zugewendete Seite und mit ihr die abgewendete sich dem Strome st parallel stellen, und zwar so, daß in der zugewendeten Seite der Strom ab dieselbe Richtung hat, wie in dem Hauptstrom st. Dahin wirken aber auch die aufsteigende und die absteigende Seite; denn die erstere wird nach dem Satze über begrenzte und unbegrenzte Ströme dem Strome entgegen, die letztere mit dem Strome fortbewegt; beide suchen sich also in der Richtung des Stromes st soweit als möglich von einander zu entfernen, was der Fall ist, wenn ihre Ebene in die Stromrichtung fällt. Eine Stromwindung stellt sich also einem nahen Strome parallel und zwar so, daß in ihrer nächsten Seite der Strom eine zu dem nahen Strome gleiche Richtung hat. Ganz in derselben Weise stellen sich alle Elementarströme eines M. gegen einen Strom, sie stellen sich demselben sämmtlich parallel, und stellen daher ihre Achsenrichtung auf denselben senkrecht, womit Oersteds Gesetz erklärt ist. Geht nun wie in der Figur der Strom wagrecht von links nach rechts, und befindet sich über demselben eine rechteckige Windung, so stellt sich die untere Seite parallel, der Strom geht in derselben nach rechts, steigt rechts auf, kreist oben

Fig. 319.



nach links u. s. w., kurz er hat für den Beschauer die entgegengesetzte Richtung der Uhrzeiger, der Beschauer hat auf seiner Seite den Nordpol und jenseits des Stromes den Südpol. Des Beschauers Seite ist aber für einen Schwimmer von links nach rechts, der hier, um die Windung zu sehen, auf dem Rücken liegen muß, die linke Seite; folglich hat der Schwimmer den Nordpol links, womit Ampères Schwimmerregel abgeleitet ist.

524 Elektrodynamische Rotationen. Eine Rotation eines beweglichen Stromes um einen kreisförmigen festen Strom ist schon zum Nachweise des Satzes über begrenzte und unbegrenzte Ströme angeführt worden. Der feste Strom kann aber auch durch einen M. ersetzt werden, und man erhält dann die Rotation eines Stromes um einen Magnet. Auf einem vertical befestigten M. befindet sich ein Quecksilbernäpfchen, in welchem mittels einer feinen Spitze ein Bügel aus Kupferdraht schwebt, dessen Enden in eine kreisförmige mit Quecksilber gefüllte Rinne herabgehen; diese umgibt den Magnetstab ungefähr in der Mitte, die eine Klemme führt zu der Rinne, die andere zu dem Schälchen, folglich geht der Strom durch die beiden Bügelhälften, entweder zur Rinne hinab oder von der Rinne zum Näpfchen hinauf. Denken wir uns nun z. B. den aufsteigenden Strom neben dem mittleren Querschnitte des M., in dem wir uns nach Ampères Theorie einen Kreisstrom vorstellen dürfen, so wird der aufsteigende Strom von dem Halbkreise angezogen, in welchem der Kreisstrom von dem Convergenzpunkte wegströmt, und von dem anderen Halbkreise abgestoßen; die beiden den aufsteigenden Strom enthaltenden Bügelhälften müssen also dem Kreisstrome des M. nachlaufen. Würde der Strom in demselben abwärts gehen, so müßte der Bügel sich dem Magnetstrome entgegendrehen. Wie demnach der feste Kreisstrom eines M. einen beweglichen Strom in Rotation versetzt, so kann umgekehrt ein fester Strom einen beweglichen M. zum Rotiren bringen. Man benutzt zur Rotation eines Magnetes um einen Strom die Quecksilberrinne des vorigen Apparates, die auch hier mit der einen Klemme verbunden ist, während die andere Klemme mit einem Metallstabe in Verbindung steht, der nur bis in den Mittelpunkt der Kreisrinne sich erhebt und dort ein Quecksilbernäpfchen trägt. Von einem gerade über demselben befindlichen Häkchen kommt ein Faden herab, an welchem ein zweiarmiges Messingstück befestigt ist, das in seinen Armen 2 verticale Magnetstäbe trägt und durch ein Spitzchen mit dem Quecksilber des Näpfchens und durch einen gebogenen Draht mit dem der Rinne in leitender Verbindung steht. Der Strom geht demnach in dem Metallstabe aufwärts und durch Spitzchen und Draht zum Quecksilber; da er nur bis zur Mitte der Magnete geht, so wirkt er auf die Kreisstromhälften derselben einerseits anziehend und anderseits abstoßend und dadurch drehend. Stellt man in der Mitte statt des Messingstabes einen M., welchen der Strom aber nur zur Hälfte durchläuft, so kann dieser Strom seinen eigenen Träger in Rotation versetzen; hierdurch fallen natürlich die beiden Seitenmagnete weg. — Auch kann der Erdstrom zu einer Strom-Rotation verwendet werden; man benutzt dazu den Apparat zu dem Gesetze für begrenzte und unbegrenzte Ströme, macht aber die verticalen Theile möglichst kurz, läßt den gewundenen Kupferdraht weg und schickt durch den horizontalen mittels der Rinne einen starken Strom, so wird derselbe durch den Erdstrom in Rotation versetzt.

525 b. Der Elektromagnetismus (Seebeck 1820?) besteht darin, daß der elektrische Strom einen Eisenstab in einen Magnet verwandelt, wenn er in zahlreichen parallelen Drahtwindungen um denselben herumgeleitet wird Der Elektromagnetismus des Schmiedeeisens dauert nur so lange als der Strom; jedoch bleibt für immer eine Spur desselben zurück, die man das elektromagnetische Residuum nennt. Die Lage der Pole bestimmt sich entweder nach Ampères Schwimmerregel: man denkt sich mit dem positiven Strome so schwimmend, daß man den Stab sieht, so hat man den Nordpol zur Linken; oder auch nach der Ampère'schen Theorie: der Nordpol liegt an dem Ende, wo der Strom entgegengesetzt wie die Uhrzeiger kreist. Hieraus folgt, daß beim Umkehren des Stromes die Pole vertauscht werden. In Schmiedeeisenstäben ist der so erregte Magnetismus temporär, man nennt diese temporären Magnete vorzugsweise Elektromagnete; sie haben meist die Form großer Hufeisen und können einen hohen Grad von Magnetismus erreichen. Die größten bisher beschriebenen Elektromagnete waren Faradays M. von 65 und Plückers von 84 kg; weit überwiegend größer ist der Greifswalder M., den Feilitzsch und Holtz (1880) herstellten; er wiegt an Eisenkern 628 kg und an Kupferdraht und Band 275 kg. Im Stahl entsteht theils temporärer, theils remanenter Magnetismus.

Die Erklärung des Elektromagnetismus erfolgt nach Ampères Theorie einfach damit,

daß im Eisen wie auch in anderen Körpern von parallelen Strömen umkreiste Molekularm. vorausgesetzt werden, deren Elementarströme nach allen nur möglichen Richtungen gelagert sind, welche aber durch die kräftigen Ströme der Windungen diesen und daher auch einander parallel gerichtet werden, da gekreuzte Ströme sich in parallele und gleiche Richtung zu stellen streben. Daraus folgt, daß in einem Elektromagnet die Elementarströme dieselbe Richtung wie der Windungsstrom haben, daß also der Nordpol da liegt, wo der Windungsstrom den Uhrzeigern entgegengesetzt kreist, womit bekanntlich die Schwimmerregel übereinstimmt. Wegen der Gleichheit der Stromrichtung in den Windungen und in dem Elektromagnet müssen dieser und die Spirale einander anziehen; deßhalb wird ein in eine Spirale hineinragender weicher, freier Eisencylinder ganz in dieselbe hineingezogen.

Wenn man einen Eisen- oder Stahlstab elektromagnetisirt, so dauert der Ms. ungeschwächt fort, so lange die Stromstärke sich nicht ändert; unterbricht man den Strom, so verschwindet der Ms. in Stahlstäben nur zum geringen Theile, in weichen Eisenstäben größtentheils. Man kann demnach Stahlstäbe zu permanenten M. mittels des el. Stromes machen; sehr geeignet ist hierzu das Verfahren von Elias. Kupferdraht wird zu einem hohlen, kurzen, dicken Cylinder zusammengewunden, und dann wird ein Stahlstab, wenn in dem Drahte ein kräftiger Strom einer großplattigen Kette kreist, mehreremale innerhalb desselben hin- und hergeführt und in der mittleren Lage festgehalten, worauf der Strom geöffnet wird. Auch eine Bandspirale kann man hierzu mit Vortheil benutzen (s. 453.). Da man indeß für viele Zwecke große hufeisenförmige Elektrom. nöthig hat und durch Streichen an denselben Stahlstäbe am leichtesten und stärksten magnetisirt werden können, so wendet man gewöhnlich dieses Verfahren an. — Für elektromagnetische Versuche bedarf man, da der äußere Widerstand nur in dem des Windungsdrahtes besteht, also gewöhnlich nur klein ist, nach Ohms Gesetz einer großplattigen Batterie.

Die erste elektromagn. Erfahrung machte Arago (1820) bald nach Oersteds Entdeckung: er fand, daß ein von einem el. Strome durchflossener Kupferdraht mit Eisenfeile bestreut, diese festhält, indem er sie zu einer Art von Röhre vereinigt, welche beim Oeffnen des Stromes zerfällt; dann fand er, daß eine Stahlnadel magn. wird, wenn man sie in eine Glasröhre bringt, die schraubenförmig von einem Strome umwunden ist.

Page (1838) beobachtete, daß das Magnetisiren eines Eisenstabes mittels einer galv. Spirale von einem Tone begleitet ist, der nach Marrian (1844) mit dem Longitudinaltone des Stabes, wie er durch Reiben in der Längsrichtung entsteht, übereinstimmt. Wertheim (1848) fand die Tonhöhe unabhängig von der Dicke des Stabes; er unterbrach den Strom öfter mittels des Blitzrades und fand, daß die Tonhöhe von der Zahl der Unterbrechungen unabhängig sei; Reis in Friedrichsdorf dagegen erhielt, wenn die Unterbrechungen durch die Schwingungen eines Tones selbst geschehen, in dem umwundenen Eisendrahte einen Ton von der Höhe des unterbrechenden Tones, worauf er sein Telephon (1860) gründete. Wertheim erhielt sogar einen Ton in einem Eisenstabe, wenn ein Strom durch denselben geleitet wurde; auch beobachtete er eine im Augenblicke der Magnetisirung auftretende sehr kleine Verlängerung des Stabes, die er für die Ursache des Tones hielt, und die Joule bei einem Versuche = 1/270000 der Stablänge fand. Das galvanische Tönen wurde von Poggendorff (1857) auch in einem Cylinder von Eisenblech beobachtet, der über eine aufrecht stehende Magnetisirungsspirale geschoben wurde, und zwar sowohl, wenn der Cylinder ganz, als auch wenn er vertical aufgeschnitten war, und im letzten Falle besonders stark, wenn sich die Schnittränder einander berührten.

Ueber die Verlängerung von Eisen- und Stahlstäben beim Magnetisiren durch Spiralströme liegen neuere Untersuchungen von Alfred Mayer (1874) vor. Beim ersten Magnetisiren werden beide Arten von Stäben plötzlich verlängert und behalten die Verlängerung bis zur Oeffnung des Stromes, nach welcher im Eisenstabe eine allmälige Verkürzung, im Stahlstabe aber eine abermalige Verlängerung eintritt. Bei weiteren Stromschlüssen zeigen die Eisenstäbe abermals Verlängerungen, die Stahlstäbe aber Verkürzungen, während beim Oeffnen beiderseits die entgegengesetzten Erscheinungen eintreten. Das umgekehrte Verhalten des Stahles gegen Eisen fand in sehr hartem Stahl auch schon beim ersten Magnetisiren statt. Die Verkürzungen des Eisens bei der Stromöffnung sind immer geringer als die Verlängerungen beim Schließen, so daß eine dauernde Verlängerung übrig bleibt; der Theil derselben jedoch, welcher durch die späteren Versuche entsteht, schwindet nach mehreren Stunden wieder, da er von der beim Entmagnetisiren entstehenden Wärme herrührt. — Balfour-Stewart und Schuster (1874) fanden, daß Kupferdraht, der um einen kräftigen Elektromagnet gewunden ist, zuerst seinen Leitungswiderstand vergrößert, im Allgemeinen aber verkleinert, sowie seine Stelle in der Spannungsreihe ändert.

526 Gesetze des Elektromagnetismus. Nach Untersuchungen von Lenz und Jacobi (1838) ist das in einem und demselben Stabe erregte elektromagn. Moment unabhängig von der Weite der Windungen, aber direct proportional der An-

zahl derselben und der Stromstärke. Man nennt daher das Product aus der Anzahl der Windungen mit der Stromstärke die *magnetisirende Kraft* der Spirale. Nach eingehenden Versuchen von Müller (1860) gilt dieses Gesetz nur für Stäbe von nicht zu kleinem Dm.; für dünnere Stäbe findet sich, daß die Stärke des M. langsamer zunimmt als die magnetisirende Kraft der Spirale, und daß sich das magn. Moment eines Stabes bei steigender magnetisirender Kraft einem Max. nähert, nach dessen Erreichung keine Vergrößerung der Stromstärke und der Windungszahl noch einen Einfluß auf den M. hat. Nach Weber gilt dieses Müller'sche Gesetz allgemein für alle Elektrom.; das Max. des Ms., das durch keine Vergrößerung der Stromstärke und der Windungszahl überboten werden kann, ist erreicht, wenn sämmtliche Molekularm. gedreht, wenn sämmtliche Elementarströme einander parallel und gleich gerichtet sind. Ueber den Einfluß der Stabdicke hatten Lenz und Jacobi (1844) gefunden, daß das magn. Moment der Stabdicke direct proportional sei. Dub (1861) zeigte dagegen, daß diese Forscher ihren Versuchen nicht die richtige Deutung gegeben hätten, daß vielmehr nach diesen Versuchen der *Elektromagnetismus eines Stabes der Quadratwurzel des Durchmessers proportional* sei. Müllers Untersuchungen stimmen hiermit nicht ganz überein; nach diesen ist soweit, als man den M. der Stromstärke proportional setzen kann, derselbe auch der Quadratwurzel aus dem Stabdurchmesser proportional; sonst verhalten sich die magn. Momente verschiedener Stäbe wie die Quadratwurzeln aus den dritten Potenzen der Stabdurchmesser; und das Max. des Ms. ist dem Quadrat des Durchmessers proportional. Ueber den Einfluß der Länge fanden Lenz und Jacobi (1844), sowie Wiedemann (1864), daß das magn. Moment stärker als mit dem Quadrat der Länge, aber weniger stark als mit der Wurzel aus der fünften Potenz zunimmt. Das erregte magn. Moment hängt auch von der Beschaffenheit der Eisensorte ab; in Schmiedeeisen zeigte sich z. B. das temporäre Moment = 0,49, in geglühtem Stahl = 0,4, in hartem Stahl = 0,26, in Gußeisen = 0,22; doch hat der Stahl ein mit der Härte wachsendes permanentes Moment (s. 453). Theoretisch fand Waltenhofen (1873) das allgemeinere Gesetz: Die magnetisirende Kraft einer beliebig gestalteten Spirale ist proportional dem Product der Stromstärke mit der Summe der Cosinusse aller Winkel, welche die in der Ebene eines axialen Schnittes von einem Punkte jeder Windung zu den Endpunkten der Achse des magnetischen Stabes gezogenen Graden mit derselben einschließen; $\Sigma M = CS \,.\, \Sigma \cos \varphi$. Als ein specieller Fall folgt hieraus das Gesetz von Haedenkamp und Wachsmuth: Die Wirkung einer cylindrischen Spirale ist proportional der Differenz der Summen der Diagonalen und der nicht parallelen Seiten eines Trapezes, dessen parallele Seiten die Achse des Eisenkernes und eine Seite des Spiralcylinders sind.

Die Anziehung zweier Magnetpole gegen einander oder, was dasselbe ist, die Anziehung eines Poles gegen ein Stück genähertes Eisen wächst mit dem Product der beiden Msmen., ist daher dem Quadrat der Stromstärke proportional, wie sowohl Versuche von Lenz und Jacobi (1838) als auch von Dub (1851) darthun. Betreffs der Tragkraft läßt sich kein allgemeiner Satz aufstellen; Dubs (1849) Versuche zeigten, daß die Tragkraft eines Poles langsamer wächst als das Quadrat der Stromstärke, aber rascher als die Stromstärke selbst. Dasselbe gilt für Hufeisenm.; dabei zeigt sich denn, daß die Tragkraft eines geschlossenen Hufeisens weit größer ist als die Summe der Tragkräfte der einzelnen Pole. Magnus hatte einen Elektrom. angefertigt, dessen Pole nur 1^{kg} tragen konnten, der aber nach Anlegung des Ankers 70^{kg} zu tragen im Stande war. Diese Erscheinung erklärt man dadurch, daß durch das Anlegen eines Ankers das Hufeisen ein geschlossener M. werde, wodurch das magn. Moment an den Enden sich zu der Höhe steigere, die es nach van Rees in der Mitte eines Stabes besitze. Nach Dub ist die Tragkraft auch von der Masse und der Gestalt des Ankers abhängig und wächst im Allgemeinen mit der Masse des Ankers. Auch fand derselbe, daß bei gleicher Stromstärke und gleicher Ankerlänge ein dünnerer M. oft mehr trägt als ein dicker, sowie daß eine ebene Polfläche am Ende des Hufeisens selbst günstiger wirkt, als Verjüngungen derselben oder vergrößerte Ansatzstücke, und daß endlich die Tragkraft bei höherer Temp. etwas kleiner wird. — Wird bei vorgelegtem Anker der Strom unterbrochen, so verliert der Elektrom. nicht seinen ganzen Ms., wie es der Fall sein würde, wenn der Anker fehlte; dieser zurückbleibende Ms. in dem geschlossenen Hufeisen wird *magn. Residuum* genannt; dasselbe verliert sich erst beim Abreißen des Ankers, noch rascher aber durch Umkehren des Stromes; es ist um so geringer, je reiner und weicher das Eisen ist, und je weniger Masse der Eisenkern enthält; für Elektrom., die rasch ihren Ms. verlieren sollen, wendet man daher hohle Eisenkerne, Blechröhren u. s. w. an. Indessen dringt doch der Elektroms. nicht tief in das Innere des Eisenkernes ein. Nach Feilitzsch (1851) werden von schwächeren Strömen nur die oberflächlichen Schichten magnetisirt, so daß ein massiver und ein hohler Eisenkern dieselbe magn. Kraft erhalten; von einem stärkeren Strome erst werden auch die inneren Schichten magnetisch, aber so, daß auf dem Querschnitte die magn. Kraft rasch vom Rande nach innen abnimmt. Ueber die Vertheilung des Elektroms. auf der

Länge des Stabes sind die Forscher noch nicht ganz einig, trotzdem die Folgerungen ... denselben Resultaten von Lenz und Jacobi (1844) gezogen wurden, und diese Differenz ... zieht sich sowohl auf den freien Ms. der einzelnen Stellen eines Elektrom. als auch ... magn. Polarität der einzelnen Querschnitte. Diese letztere nimmt bekanntlich nach ... bei einem gewöhnlichen M. von den Polen nach der Mitte hin zu; dasselbe findet auch ... Elektrom. statt, und zwar nach Dub proportional der Quadratwurzel aus der Entf. ... Querschnittes von dem nächsten Ende des M., während van Rees das Gesetz durch die ... ausspricht $z = a + b(\mu^x + \mu^{-x})$, worin a, b und μ constante Größen, z das ... Moment eines Querschnittes und x dessen Abstand von der Mitte des Stabes ... die Formel gilt auch für gewöhnliche M., für welche sie van Rees aus einer Formel ... für den freien Ms. ableitete, die derselbe aus Coulombs Versuchen über die Vertheilung ... freien Ms. auf der Länge eines Stabes gewonnen hatte. Von analoger Gestalt zeigt sich die ... welche die Vertheilung des Ms. auf der Länge der Anker ausspricht, wie von Weihrich (1... dargethan wurde; außerdem hat Green (1828) aus seinen theoretisch gefundenen für ... die Magnetisirung eines Körpers, die mit Poissons Resultaten übereinstimmen, für den ... Ms. eines dünnen langen Stabes eine analoge Formel gefunden, wodurch es wohl ... daß die Rees'sche Formel das Gesetz der Vertheilung ausdrückt, und daß Dubs Satz ... eine Annäherung an die Wahrheit ist. Viel stärker indeß, als das magn. Moment nach ... Mitte hin zunimmt, nimmt der freie Ms. von den Polen nach der Mitte hin ab, was ... auch in Biots Formel $y = c(\mu^{-x} - \mu^x)$ im Vergleiche zur Rees'schen Formel ausspr... wobei man berücksichtigen muß, daß μ ein ächter Bruch ist.

527 c. Der Diamagnetismus (Faraday 1845). Die meisten Körper ... entweder paramagn., d. h. sie werden von beiden Polen eines sehr starken Elektro... magnetes angezogen, oder diamagn., d. h. sie werden von beiden Polen abgestoßen. Man bedarf zu solchen Versuchen zweier Eisenkerne von wenigstens 460mm ... und 25mm Dicke, welche durch eine Eisenplatte, auf der sie stehen, zu einem Huf... verbunden und auf ihrer ganzen Länge vielfach mit dickem Kupferdrahte umwunden sind, während auf den nach oben gerichteten ebenen Polflächen eiserne, spitz zulaufende Aufsätze liegen, deren nun die Pole bildende Spitzen einander ganz nahe kommen. Zwischen diese Spitzen werden in Stabform, an einem Cocon- oder Seidenfaden hängend, durch ein Glasgehäuse vor Luftzug geschützt, die zu untersuchenden Körper gebracht. Ein Eisen-, Nickel- oder Kobaltstäbchen stellt sich in die Verbindungslinie der beiden Spitzen oder, wie Faraday sagt, axial, weil es selbst ein Magnet ... entgegengesetzten Polen wird, und weil diese Pole sich dann so nahe wie möglich ... die entgegengesetzten Spitzen stellen; ein Wismuthstäbchen stellt sich auf die Verbindungslinie der Spitzen senkrecht oder äquatorial; daraus folgt, daß jedes seiner Enden von der nächsten Polspitze abgestoßen wird.

Diese Abstoßung ist auch direct sichtbar, wenn das Stäbchen nicht in der Mitte ... beiden Spitzen hängt; es wird dann beim Schließen des Stromes nicht blos äquatorial gestellt, sondern auch seitlich von dem näheren oder von beiden Polen entfernt; oder ... man einen kleinen Würfel oder eine kleine Kugel von Wismuth aufhängt; diese werden ... auch von dem näheren Pole entfernt oder seitlich von beiden Polen im Magnetfelde versch... oder auch, wenn man Stäbchen oder Kugel nur an einem Pole aufhängt; man sieht ... ebenfalls eine entfernende Verschiebung und äquatoriale Richtung. — Paramagnetisch ... sich so: Eisen, Nickel, Kobalt, Platin, Palladium, Titan, Mangan, Chrom, Cerium, ... mium, die meisten Salze dieser Metalle (Ausnahmen Ferrocyankalium, Platinchlorid, Chrom... trioxyd, welche diam. sind); dann Flußspath, Turmalin, Porcellan, Tusche, Papier u. ... Diamagn. sind: Wismuth, Antimon, Zink, Zinn, Cadmium, Quecksilber, Blei, ... Kupfer, Gold, Arsen, Uran, Rhodium, Iridium, Wolfram und die meisten Salze ... Metalle; dann Phosphor, Schwefel, Tellur, Jod, Kohle, Flintglas, Fett, Fleisch, Holz, ... bein, Eis. Die Flüssigkeiten füllte Faraday in dünne Glasröhrchen, die ebenfalls ... die Spitzen aufgehängt wurden und sich dann entweder axial oder äquatorial stellten; ... füllte sie in Schälchen von Glimmer oder Glas, die er auf die genäherten Pole ... paragm. Flüssigkeiten zeigten dann über jedem Pole einen Berg, diam. nur einen ... zwischen den Polen; es fanden sich diam. Wasser, Lösungen diamagnetischer und ... Lösungen paramagnetischer Salze, Alkohol, Aether, Schwefelsäure, Salpetersäure, ... u. s. w.; param. erschienen concentrirte Lösungen param. Salze. — Merkwürdig ist die Erscheinung, daß eine param. Substanz sich diam. verhält, wenn sie in einer stärker param. Flüssigkeit schwebt, und daß eine diam. Substanz in einer stärker diam. Flüssigkeit param. wird; ein Glasröhrchen ist für sich diam., stellt sich aber in Wasser axial, selbst wenn ...

ismuthwürfel an demselben hängt; eine 4procentige Eisenvitriollösung ist in einer 15 pro-
ntigen diam., in einer 1 procentigen paragm., in einer 4 proc. indifferent. Plücker (1850)
lte auf einen Pol ein Gefäß, auf dessen Glimmerboden eine an einer Wage balancirte
ismuthkugel ruhte; beim Schließen des Stromes mußten für das Gleichgewicht aus der
deren Schale 785, 745, 885^{mg} genommen werden, je nachdem das Gefäß mit Luft, Wasser
er Eisenchlorid gefüllt war; die Gewichte geben die verschiedene Größe der diamagnetischen
stoßung in verschiedenen Medien an. Die hier auftretende Analogie mit dem Archime-
chen Princip geht so weit, daß man nach Becquerel sagen kann, ein Körper verliert in
em Medium soviel von seiner magn. Eigenschaft, als das verdrängte Medium enthält. —
rch den Einfluß des Mediums sind die Versuche über Gase stark beeinträchtigt. Faraday
d Plücker gelang es indeß (1848), den Diamagnetismus der meisten Gase in der Luft,
wie den Paramagnetismus des Sauerstoffs und der Luft nachzuweisen. Plücker ließ einen
rom farbiger Gase zwischen den Polen aufsteigen und fand sie meist in äquatorialer Rich-
ng verbreitert. Faraday mischte etwas Chlorwasserstoffgas unter die aufsteigenden Gase,
d brachte in einiger Höhe über den Polen sowohl in der axialen, als in der äquatorialen
chtung Fangröhren an, die mit Ammoniakgas gefüllt waren; erschien der weiße Salmiak-
mpf in einem äquatorialen Röhrchen, so war das Gas diam.; zeigte er sich in einem
alen, so war es param. Auch Wasserdampf und Quecksilberdampf sowie die Flammen
d Kerzenrauch verbreiterten sich äquatorial zwischen den Polen, sind also diam. Plücker
851) füllte die Gase in eine dünne, gläserne Kugel, die leer gepumpt indifferent erschien,
d erhielt dann dieselben Resultate; die am schwächsten diam. Gase, wie Stickstoff und
hlendioxyd zeigten hier keine Wirkung, dagegen wurde Sauerstoff stark angezogen und
asserstoff stark abgestoßen.

Die diam. Abstoßung rührt nach vielfachen Untersuchungen davon her, daß der be-
ffende Körper in der Nähe eines Poles des Elektrom. nicht einen ungleichnamigen, son-
rn einen gleichnamigen Pol, dagegen am anderen Ende einen ungleichnamigen Pol erhält,
ß also die durch einen Magnetpol erregte Polarität des Wismuths umgekehrt ist wie die
s Eisens. (Reich 1848) näherte einer an einer sehr empfindlichen Drehwage befestigten
ismuthkugel, die von einem Nordpole stark abgestoßen wurde, auch noch einen Südpol
d fand dann, daß die Wirkung compensirt war. Tyndall (1856) zeigte, daß, wenn von
gleichnamigen Halbpolen ein Wismuthstäbchen äquatorial gestellt wurde, diese Stellung
fhörte, wenn der eine Halbpol ungleichnamig wurde. Plücker und Tyndall zeigten, daß
t Wismuthstäbchen in einer Spirale polarisch wurde, aber entgegengesetzt wie Eisen, und
. Weber construirte (1856) sein Diamagnetometer, mittels dessen er nicht nur die
m Eisen entgegengesetzte Polarität des Wismuths nachwies, sondern auch fand, daß das
agn. Moment des Wismuths 1½ Mill. mal kleiner ist als das eines Eisenstabes von
icher Masse. Sein Apparat bestand aus zwei Spiralen, in welchen 2 Wismuthstäbchen
rch einen über 2 Rollen gehenden Faden ohne Ende in eine beliebige Lage gebracht wer-
n konnten, und vor welchem ein kleiner Magnetstab drehbar und mit einem Spiegel ver-
hen aufgestellt war. Wurde durch die Spiralen ein Strom geleitet, so wurde das Wis-
uth magn. und lenkte den M. ab; die Ablenkung wurde mittels Fernrohr und Skale
messen; sie geschah bei Ersetzung der Wismuth- durch Eisenstäbe in entgegengesetzter Rich-
ng, und aus ihrer Größe konnte das mag. Moment berechnet werden. Aus der Pola-
tät der magn. Substanzen erklärt sich der Einfluß des Mediums. Durch einen Hufeisen-
z. B. wird sowohl ein benachbarter Körper als auch das zwischen beiden liegende Me-
um polarmag.; sind beide z. B. param.; so wenden beide ihre ungleichnamigen Theile
ch dem Hufeisenpole; folglich ist das Medium an dem Körper entgegengesetzt, wird abge-
ßen, wo dieser angezogen wird, und übt daher gegen diesen einen Druck aus; je nachdem
ser Druck kleiner, ebenso groß oder größer ist als jene Anziehung, zeigt sich der Körper
ram., indifferent oder diam. — Die Stärke der diam. Kraft ist abweichend vom Eisen
r magnetisirenden Kraft proportional; nur bei sehr starken Strömen fand Plücker ein
ngsameres Wachsen. — Kugeln aus magn. Substanzen können zwischen den Polen keine be-
mmte Lage annehmen; dieser einfachen Folgerung gehorchen aber aus manchen Krystallen
drehte Kugeln nicht, nehmen vielmehr eine feste Lage an, und zwar so, daß ihre Hauptachse
er ihre optische Achse sich axial oder äquatorial stellt; Faraday schreibt diese Erscheinungen
ner Eigenthümlichkeit der Krystalle zu, die er Magnetkrystallkraft nennt, und Plücker
855) unterscheidet positive und negative Krystalle, je nachdem der Ms. der Achse mit
m des Stoffes übereinstimmt oder nicht; so findet Plücker z. B. pos. param. den Spath-
senstein, neg. param. den Turmalin, pos. diam. den Kalkspath, neg. diam. Eis.

Ein noch interessanterer Zusammenhang des Ms. mit der Optik ist die Drehung **528**
er Polarisationsebene durch Magnetismus und elektrische Ströme; Fa-
aday entdeckte dieselbe (1846) und fand auch schon, daß die Drehung im Glase der magn.
raft proportional ist und in dem Sinne erfolgt, wie die Drehung der Elementarströme
es M. Am vortheilhaftesten für Beobachtung fester Körper ist Ruhmkorffs Apparat (1848);

derselbe besteht aus 2 in einer Richtung liegenden Spulen mit hohlen Eisenkernen, [illegible] denen soviel Raum frei bleibt, daß das z. B. zu untersuchende Glas die beiden Pole berührend aufgestellt werden kann; in beide Spulenden sind Nicols eingeschoben; durch den einen wird das Licht polarisirt, geht durch die Kernhöhlung auf das Glas, dann durch die andere Kernhöhlung und den zweiten Nicol; ist das Gesichtsfeld bei offenem Strome dunkel, so wird es beim Schließen des Stromes hell; die Drehung des einen Nicols bis zur ehemaligen Dunkelheit gibt die Größe der Drehung der Polarisationsebene an. Für Flüssigkeiten kann Soleils Saccharimeter dienen, wenn dessen Röhre von einem Stromdrahte umwunden ist; nach Wiedemann (1851) ist hier die Drehung analog zu Faradays Gesetz der Stromstärke proportional. Anfänglich wurden vorwiegend Glas und diamagnetische Flüssigkeiten geprüft; Verdet untersuchte (1856) auch Lösungen von Eisensalzen; da diese schwächer drehen als das Lösungswasser, so vermuthete V., daß das paramagn. Eisensalz eine der Richtung der Ströme entgegengesetzte Drehung bewirke, während die untersuchten diam. Körper in der Richtung der Ströme drehen; er fand diese Vermuthung durch Untersuchungen von Eisenchlorid bestätigt und nannte diese Drehung der Polarisationsebene eine negative, im Gegensatz zu der mit der Stromrichtung stimmenden, also positiven der diam. Körper. H. Becquerel nahm (1876) diese Untersuchungen wieder auf und beobachtete, daß die neg. Drehung der Eisensalzlösung der Concentration der Lösung prop. wachse, daß aber die pos. Drehung der diam. Körper, vorausgesetzt, daß ihre magn. Eigenschaft gleich sei, mit dem Brechungsexp. wachse und zwar prop. dem Ausdrucke $n^2(n^2-1)$. Zu jener Zeit wurde die Aufmerksamkeit der Physiker von Neuem auf diesen Gegenstand gelenkt durch Kerrs Forschungen; derselbe hatte nämlich (1875) gefunden, daß Glas und zahlreiche dielektrische Flüssigkeiten, die er durch Verbindung mit beiden Polen eines sich entladenden Ruhmkorff'schen Inductors stark dielektrisirt hatte, ebenfalls die Polarisationsebene durchgehenden Lichtes drehen, und zwar die flüssigen Körper fast augenblicklich, die festen erst nach längerer Dauer der Einwirkung. Bald darauf machte er die Entdeckung, daß auch durch die Reflexion polarisirten Lichtes von glatten Flächen eines Magnetes die Polarisationsebene eine Drehung erfahre und zwar eine entgegengesetzte zu der Richtung der Elementarströme des M., also eine negative, wie durch die Eisensalze im magn. Felde; dieselbe beobachtete nun auch Hall (1880) an stark magnetisirtem Nickel und Kobalt, während das bekanntlich diamagnetische Silber bei stärkster Magnetisirung keine Wirkung ergab. Seine erste Entdeckung dehnte Kerr (1879) weiter aus, benutzte aber statt des Ruhmkorff eine Holtz'sche Masch. und Leydener Flaschen; auch die statische El. dreht hiernach die Polarisationsebene in dielektrischen Körpern und zwar in Harz und fetten Oelen in entgegengesetzter Richtung, negativ, als in Glas, Schwefelkohlenstoff, Benzol und ähnlichen Flüssigkeiten, positiv. Fast gleichzeitig fanden bald nachher Kerr und Röntgen, daß die elektrooptische Wirkung in dielektrischen Körpern mit der Potentialdifferenz wächst und zwar nach Kerr (1880) prop. zu dem Quadrat der Potentialdifferenz. Diese gleichzeitige Forschung in verschiedenen Ländern war noch auffälliger in den Untersuchungen über die Drehung der Polarisationsebene in Gasen und Dämpfen durch el. Ströme. Kundt u. Röntgen in Deutschland, H. Becquerel in Frankreich, Bichat in Frankreich und Lippich in Oesterreich beobachteten (1879), was Faraday nicht gelungen war, daß auch Gase und Dämpfe im magn. Felde das Licht doppelt brechen i. e. die Polarisationsebene drehen. Kundt und Röntgen benutzten zuerst Dampf von Schwefelkohlenstoff, weil dieser Körper in flüssiger Form eine starke Drehung bewirkt und weil sein Dampf schon bei niedriger Temp. eine hohe Spannung hat. Als die Drehung unzweifelhaft erfolgte, untersuchten sie die wichtigsten Gase unter dem hohen Drucke bis zu 250at; alle Gase ergaben eine pos. Drehung, selbst O, dessen paramagnetisches Verhalten eine neg. Drehung hatte vermuthen lassen; bei einem und demselben Gase wächst die Drehung annähernd mit der Dichte, bei verschiedenen Gasen mit dem Brechungsexp., ohne jedoch mit demselben in einer einfachen Beziehung zu stehen. — Schon (1846) hatte Wartmann die Drehung der Polarisationsebene der strahlenden Wärme im magn. Felde wahrgenommen; Grunmach hat (1881) die Untersuchung mit den vollkommeneren Einrichtungen der Jetztzeit neu aufgenommen und nicht blos die Thatsache der Drehung nachgewiesen, sondern auch die Uebereinstimmung der Drehrichtung mit der der Elementarströme, das Wachsen mit dem B.-E., mit der Stromstärke oder der magn. Kraft und der Dicke der durchstrahlten Schicht. — Nachdem H. Becquerel (1878) die Drehung der Polarisationsebene des Lichtes, das durch Schwefelkohlenstoff geht, durch den Erdmagnetismus beobachtet hatte, gelang es ihm (1881), diese Drehung auch genau zu messen und dadurch einen neuen Beitrag für die Constanten des Erdms. zu liefern.

529 **8. Die Induction** (Faraday 1831). a. Entstehung und Gesetze. Unter Induction versteht man die Erzeugung von el. Strömen durch el. Ströme und durch Magnete. Die Erregung durch die el. Ströme nennt man Elektro-Induction, Volta-Induction oder auch Induction kurzweg, die Erregung durch Magnete heißt

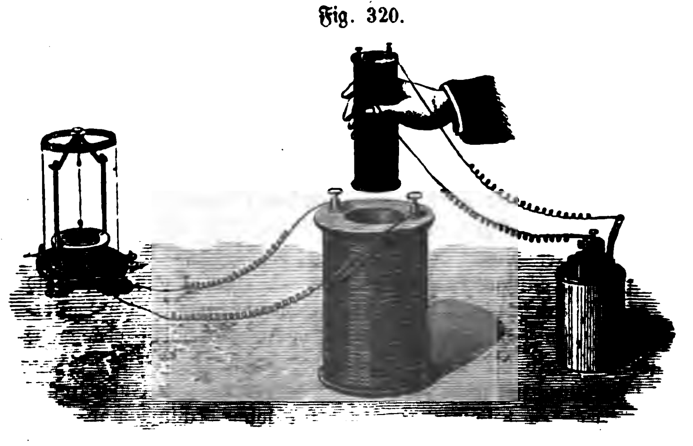
Magneto=Induction. Es gibt folgende acht verschiedene Arten der Induction: . Wenn man in der Nähe eines Leiters einen Strom schließt, so entsteht in dem ℓeiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung. 2. Wenn man in der Nähe eines ℓeiters einen Strom öffnet, so entsteht in dem Leiter ein Strom von gleicher Rich= ung. 3. Wenn man einem Leiter einen Strom nähert, so entsteht in dem Leiter in Strom von entgegengesetzter Richtung. 4. Wenn man von einem Leiter einen Strom entfernt, so entsteht in dem Leiter ein Strom von gleicher Richtung. 5. Wenn nan in der Nähe eines Leiters Magnetismus erregt, so entsteht in dem Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. . Wenn in der Nähe eines Leiters Magnetismus verschwindet, so entsteht in dem eiter ein Strom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. . Wenn man einem Leiter einen Magnet nähert, so entsteht in dem Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. . Wenn man von einem Leiter einen Magnet entfernt, so entsteht in dem Leiter in Strom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. Die erregenden Ströme nennt man Hauptströme oder inducirende Ströme, die rregten Ströme Nebenströme, inducirte oder Inductionsströme. Als Leiter enutzt man für beide gewöhnlich Spiralen von Kupferdraht, weil dann bedeutende ängen auf einander wirken; für den Hauptstrom muß der Draht dick sein, da= nit er nicht zu sehr durch Leitungswiderstand geschwächt werde; für den Neben= trom dagegen nimmt man feinen Draht, weil derselbe einen starken Widerstand ertragen kann, und damit die Windungszahl möglichst groß werde. Die Ströme nter 1. und 2. entstehen nicht blos beim Schließen und Oeffnen eines Stromes, ondern auch bei jeder Verstärkung oder Schwächung desselben; auch entstehen sie icht blos in einem benachbarten Leiter, sondern auch in dem Stromleiter selbst. In einem Stromkreise entsteht beim Schließen des Hauptstromes ein Strom von ntgegengesetzter Richtung, der im Moment des Schließens den Hauptstrom und adurch die Schlußwirkung schwächt; beim Oeffnen eines Stromes entsteht in em Stromkreise ein Strom von gleicher Richtung, der die Oeffnungswirkung chwächt, weil diese Wirkung auf dem plötzlichen Aufhören des Hauptstromes be= uht, das wegen der allmäligen Ausbreitung des entstandenen Stromes in dem Leiter nicht stattfindet. Diese beiden in dem Stromleiter selbst entstehenden Ströme ennt man Extraströme; sie schwächen die Schluß= und Oeffnungswirkung er Batterieströme.

Die Inductionsströme unterscheiden sich dadurch von den Batterieströmen: 1. sie ind nur von momentaner Dauer, oder wenn sie durch Bewegung entstehen, von der ewöhnlich ebenfalls sehr kurzen Dauer der Bewegung; deßhalb fällt bei ihnen die Oeffnungswirkung mit der Schlußwirkung zusammen. 2. Ihre Oeffnungs= und Schlußwirkung wird nicht so stark durch Extraströme geschwächt, wie die der Haupt= tröme, weil das Oeffnen und Schließen des Inductionsstromes meist oder nahe zusammenfällt und weil deßhalb die 2 Extraströme des Inductionsstromes wegen ihrer entgegengesetzten Richtung sich meist oder nahezu aufheben. Die Inductions= ströme sind aus diesen Gründen besonders geeignet für solche Schluß= und Oeff= nungswirkungen, die in beiden Fällen gleich sind, also für physiologische und für Funkenwirkungen. Die elektromot. Kraft der Inductionsströme ist unabhängig von der Windungsweite, Dicke und dem Stoffe des Inductionsdrahtes, dagegen proportional der Zahl seiner Windungen, sowie bei der Voltainduction dem Product der Stromstärke und der Windungszahl des Hauptdrahtes, und bei der Magnet= induction dem magn. Moment des Magnetes (Lenz 1836, Weber 1846). Bei der Schätzung der Stromstärke des Inductionsstromes aber muß der Widerstand, den derselbe in und außerhalb der Inductionsspirale zu überwinden hat, berück=

sichtigt werden, und dann ergibt sich, daß die Stromstärke mit der Leitungsfähigkeit des Inductionsdrahtes zunimmt, daß bei kleinem äußeren Widerstande die Stromstärke nicht mit der Zahl der Windungen wächst, bei großem äußeren Widerstande jedoch, wie er bei Inductionsversuchen gewöhnlich vorhanden ist, mit der Zahl der Windungen zunimmt, weßhalb man für die Inductionsrolle zahlreiche Windungen eines feinen Drahtes nimmt (Folgerung 12 des Ohm'schen Gesetzes). Auch ist die Stromstärke verschieden beim Oeffnungsstrome und Schließungsstrome; beim Schließen wächst nämlich der Hauptstrom langsam wegen des entgegengesetzten Extrastromes; daher hat der Schließungsstrom eine etwas längere Dauer, dieselbe elektromotorische Kraft vertheilt sich auf längere Zeit, wodurch die Stromstärke geringer wird; beim Oeffnen des Hauptstromes dagegen entsteht zwar auch ein Extrastrom; dieser kann aber wegen der Oeffnung des Stromkreises nicht zur Wirkung kommen, so daß das Oeffnen rascher als das Schließen des Stromes vor sich geht; folglich ist dieselbe elektromotorische Kraft beim Oeffnungsstrome in eine kleinere Zeit zusammengedrängt und bildet daher eine größere Stromstärke; daher sind die Zuckungen und die Funkenlängen bei dem Oeffnungsstrome stärker als bei dem Schließungsstrome. Ein ähnlicher Unterschied besteht zwischen der Voltainduction und der Magnetoinduction: die erstere gibt geringere Mengen von bedeutender Spannung, Tensionsströme, die letztere große Mengen von geringer Spannung, Quantitätsströme, was wohl davon herrührt, daß die inducirenden Ströme aus wenigen aber starken Elementarströmen, die inducirenden Magnete aber aus unendlich vielen aber sehr schwachen Elementarströmchen bestehen.

b. Nachweise der Induction. Hierzu dienen die Inductionsspulen, Fig. 320, 2 hohle Holzcylinder von verschiedenem Durchmesser, auf welche übersponnener Kupferdraht gewunden ist, auf den weiten zahlreiche Windungen von feinem Drahte, auf den engeren weniger Windungen von dickem Drahte; die weite Spule, die Inductionsspule, steht mit einem empfindlichen Galvanometer, die enge Spule, die Hauptspule, mit einer Batterie in Verbindung, in deren Schließungsdraht ein Stromwechsler eingeschaltet ist. Stecken wir vor dem Schließen des Hauptstromes die enge Spule in die weitere und schließen dann den Strom, so wird in demselben Moment die Multiplicatornadel abgelenkt, kehrt aber nach einigen Schw. in die ursprüngliche Lage trotz der Fortdauer des Stromes zurück; hierdurch wird das Entstehen eines Stromes von kurzer Dauer angezeigt, dessen Richtung leicht nach Ampères Schwimmerregel als entgegengesetzt zu der des Hauptstromes erkannt wird Wird der Strom unterbrochen, so entsteht wieder eine Ablenkung, aber nach der entgegengesetzten Seite, welche ebenfalls nicht dauernd, sondern nur stoßweise stattfindet. Sind die Ablenkungen nur klein, so kann man sie leicht vergrößern, wenn man den Hauptstrom im Tempo der Schw. schließt und öffnet beim Vorangehen schließt und beim Rückgange öffnet. Hiermit sind denn die 2 ersten Inductionssätze nachgewiesen. Die zwei folgenden sind leicht dadurch zu zeigen, daß man bei geschlossenem Hauptstrome die enge Spule in die weitere steckt; es entsteht dann eine momentane Ablenkung im Augenblicke der Einführung und zwar nach derselben Richtung wie beim Schließen des Hauptstromes. Läßt man die Nadel zur Ruhe

Fig. 320.



kommen und zieht dann die enge Spule aus der weiteren, so entsteht wieder eine momentane Ablenkung, aber nach der entgegengesetzten Seite, also nach derselben Seite wie beim Oeffnen des Stromes. Auch hier kann man die Ablenkungen durch Einstecken und Herausziehen im Tempo der Schw. vergrößern. Es entsteht also beim Nähern und Entfernen des Hauptstromes in der Inductionsspule ein momentaner Strom, der im ersten Falle von entgegengesetzter, im zweiten von gleicher Richtung ist wie der Hauptstrom. Steckt man in die engere Spule ein Bündel von schmiedeeisernen Stäben, so werden die 4 genannten Inductionswirkungen bedeutend verstärkt; hierdurch sind die 5te und die 6te Induction nachgewiesen; denn beim Schließen des Stromes entsteht in den Stäben Ms. und beim Oeffnen verschwindet solcher; folglich entstehen beim Erregen und Verschwinden von Ms. el. Ströme. Da der erregte Ms. aus Elementarströmen von derselben Richtung besteht, wie sie die erregenden Ströme besitzen, und da der Inductionsstrom des Schließens eine von den letzteren entgegengesetzte Richtung besitzt, so ist seine Richtung auch den Elementarströmen entgegengesetzt. Der Inductionsstrom des Oeffnens hat eine den erregenden Strömen gleiche Richtung, folglich ist derselbe auch mit den Elementarströmen des M. gleich gerichtet. Noch einfacher ist der Nachweis der 2 letzten Magnetoinductionen. Man entfernt die Hauptspule und führt in die Inductionsspule einen Pol eines Magnetstabes ein; aus der entstehenden Ablenkung der Nadel ist nicht blos das Entstehen eines momentanen Stromes zu erkennen, sondern auch, daß die Richtung desselben der der Elementarströme des eingeführten Poles entgegengesetzt ist. Zieht man den Pol heraus, so zeigt die entgegengesetzte Ablenkung das Entstehen eines momentanen Stromes von entgegengesetzter Richtung, also von einer den Elementarströmen des herausgezogenen Poles gleichen Richtung an. Die Entstehung des Extrastromes geht schon daraus hervor, daß eine Batterie, die mit einem kurzen dicken Schließungsdrahte nur einen sehr schwachen Oeffnungsfunken gibt, einen sehr starken Funken erzeugt, wenn sich in dem Schließungskreise eine Inductionsspirale befindet; sind 2 Handhaben an dieser Inductionsspirale so befestigt, daß dieselbe im Moment der Stromunterbrechung durch den menschlichen Körper geschlossen ist, so empfindet man eine starke Zuckung. Doch kann man auch die Extraströme durch ein Galvanometer nachweisen, das man zusammen mit einer Spirale in einen Stromkreis einschaltet; man muß dann nur die Ablenkung der Nadel durch den Hauptstrom verhindern, indem man an der Ablenkungsseite der Nadel einen Stift anbringt; im Moment der Stromöffnung geht dann die Nadel nach der entgegengesetzten Seite. Um den Schließungsextrastrom nachzuweisen, läßt man zuerst die Nadel durch den Hauptstrom ablenken, und erlaubt ihr durch einen Stift die Rückkehr nicht, wenn alsdann der Strom geöffnet wird; schließt man nachher den Strom abermals mit eingeschalteter Spirale, so wird die Nadel noch weiter abgelenkt, kehrt aber gleich wieder an den Stift zurück; da durch den Hauptstrom die Ablenkung sich nur bis an den Stift erstreckt, so zeigt die weitergehende Ablenkung das Entstehen eines momentanen Stromes von gleicher Richtung beim Schließen des Hauptstromes an.

530 c. Inductionsapparate. 1. Der Schlittenapparat (Dubois-Reymond 1848) (Fig. 321) für medicinische Zwecke, besonders zur Erzeugung einer größeren Anzahl von Zuckungen in einem Körpertheile anwendbar, besteht aus der Hauptspule R, der Inductionsspule J mit einer Entladungsvorrichtung und dem Stromunterbrecher. Die erste, mit kleinerem Durchmesser, ist an einem aufrechten Brette, durch welches sie mit der Batterie verbunden wird, wagrecht befestigt, und enthält ein Bündel von Eisenstäben; die zweite, so weit, daß sie die erste umfassen kann, ist ebenfalls wagrecht, aber auf einem Schlitten befestigt, der auf dem horizontalen Grundbrette S so verschoben werden kann, daß die Inductionsspule die Hauptspule auf jeder beliebigen Länge umschließt; an den Klemmen a und b des Inductionsdrahtes sind zwei Handhaben oder andere für speciell therapeutische Zwecke taugliche Stromenden befestigt. Als Stromunterbrecher dient gewöhnlich der Wagner'sche Hammer (1839), der die Unterbrechung des Hauptstromes durch den Hauptstrom selbst, also selbstthätig besorgt, und demnach so viele Zuckungen erzeugt, als Unterbrechungen stattfinden. Derselbe besteht aus einem kleinen Hufeisen E, das von dem Hauptdrahte umwunden ist, ehe derselbe an die Hauptspule geht; das von der Hauptspule zurückkehrende Drahtende geht an eine Klemmschraube k, die durch ein Messingblättchen mit den Schraubenstift st verbunden ist; dieser berührt den federnden Hebel fh, der am einen Ende den über dem Hufeisen schwebenden Anker h trägt und am anderen Ende in das Messingsäulchen m eintritt, das den pos. Poldraht P aufnimmt. Hierdurch ist der Strom geschlossen, das Hufeisen E wird ein Elektrom., zieht den Anker h an und löst dadurch den federnden Hebel aus seiner Berührung mit der Schraubenspitze t, wodurch der Strom geöffnet wird; sowie also der Strom geschlossen wird, öffnet er sich selbst. Hierdurch verliert das Hufeisen seinen Ms., der Anker wird nicht mehr angezogen, und der federnde Hebel kehrt vermöge seiner Federkraft in die ursprüngliche Lage, in die Berührung mit der Schraubenspitze t zurück, wodurch der Strom wieder geschlossen wird; sowie sich also der Strom selbst geöffnet hat, schließt er sich auch wieder. An der Unterbrechungsstelle t ist bei jeder Unterbrechung ein

Funke, so daß die Schraubenspitze mit dem Hebel zusammenschmelzen würde, wenn hier ni
Platin verwendet wäre. Die Wirkung wird bedeutend schwächer, wenn das Eisendr
bündel aus der Hauptspule genommen wird, oder auch wenn statt dessen ein dicker Ei
stab hineingesetzt wird; nach Magnus (1840) entstehen in dem dicken Eisenstabe gleich

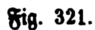
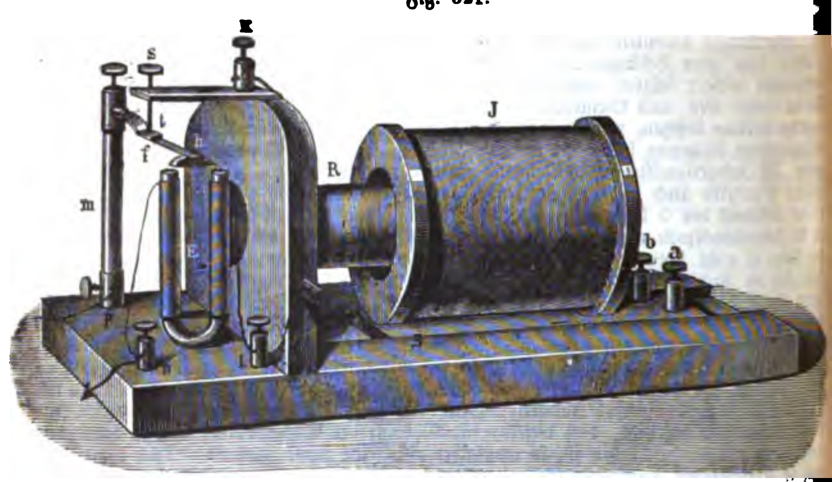


Fig. 321.



richtete Ströme bei der Unterbrechung, wodurch das Verschwinden des M8. und be
die inducirende Wirkung des Stabes geschwächt wird; in dem Drahtbündel können sich
diese Ströme nicht so ungehindert bilden wie in massivem Eisen, wodurch sich die stär
Wirkung derselben erklärt.

2. Der Funken-Inductor (Ruhmkorff 1851) (Fig. 322). Auf einen hoh
Cyl. aa von Pappendeckel ist eine Lage 2mm dicken, wohl übersponnenen Kupferdrahtes g
wunden, dessen Enden durch Klemmen p und q, Schiebleisten r, Stromunterbrecher n
und Stromwechsler mit der Batterie verbunden, getrennt und umgekehrt verbunden wer
können. Auf diese Hauptspule sind die Windungen des 1/2 bis 1/8mm dicken, übersponnen
und gestrnißten Inductions
drahtes in mehreren Lagen
einer Länge von 1 bis 20 Meil
aufgewickelt, dessen Enden zu
2 auf Glasstäben e sitzenden
Knöpfen d gehen. Zur Strom-
unterbrechung wird bei größe-
ren Apparaten Foucaults In-
terruptor, bei kleineren der üb-
liche Interruptor Stöhrers an-
gebracht, der in Fig. 322 deutlich
dargestellt ist. In demselben
geht von dem eisernen Draht-
bündel c, das in der Spule
steckt, ein eiserner Winkelhaken
stu aus, der an seinem Ende
eine eiserne Schraube u trägt;
diese wird beim Stromschlusse
ein M. und zieht einen unter
ihr schwebenden Hebel vw an,
der an seinem Ende einen in
ein Quecksilber enthaltendes
Glasgefäß y tauchenden Stift v
trägt, in welches der eine Pol-

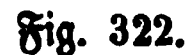
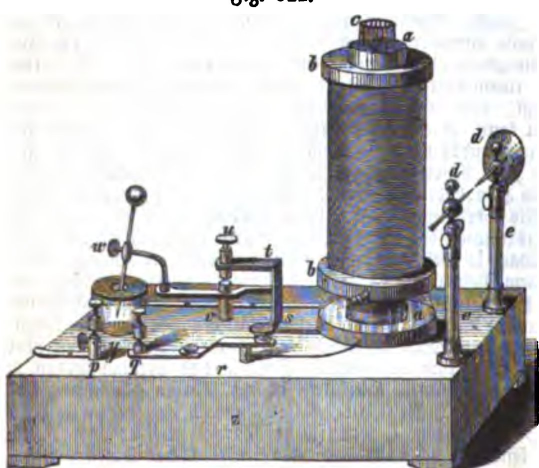


Fig. 322.



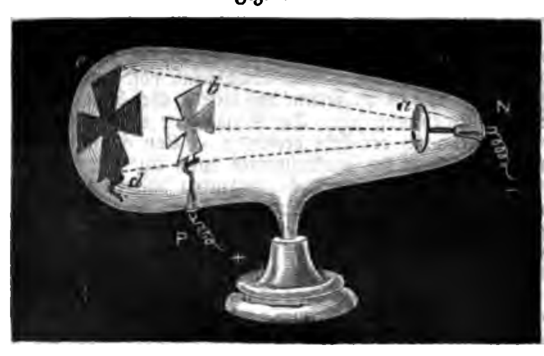
draht eingeführt ist. Durch die Anziehung des Hebels wird der Stift aus dem Quecksilber
gezogen, gelangt so in eine darüber gelagerte, schlecht leitende Flüssigkeit, wie Weingeist, und
hierdurch wird der Strom geöffnet. So erfolgen Oeffnen und Schließen wechselseitig mit-

tels einer schwingenden Bewegung des federnden Hebels. Ein sehr verstärkender Bestandtheil des Apparates ist Fizeaus Condensator (1853). Derselbe besteht aus einem mehrere Meter langen Streifen von Wachstaffet, der auf beiden Seiten mit Stanniol belegt, und um mehrere ganz gleiche, auf einander liegende Tannenbrettchen gewunden ist, und mit diesen in der Schublade des Fußgestelles z liegt; die beiden Enden des Stanniols treten durch Federn und Stifte beim Zuschieben der Lade mit dem Hauptdrahte in Verbindung, und nehmen den Extrastrom auf, wodurch die Wirkung der Unterbrechung verstärkt wird, weil dieselbe nicht durch den Extrastrom in die Länge gezogen wird. Die Knöpfe, welche die Pole des Inductionsdrahtes bilden, sind durchbohrt, um allerlei Entladungsvorrichtungen anzubringen; steckt man 2 Drahtspitzen durch dieselben, wie in Fig. 322, so springen zwischen denselben Funken von 2 bis 50^{cm} Länge und mit einem starken Knalle in regelmäßiger Folge über; der Funkeninductor gibt also einen constanten Funkenstrom, der beim Einschalten einer el. Flasche aus kürzeren, aber kräftigen, blendend hellen und klatschenden Funken besteht, welche dicke Glasplatten durchbohren. Bei geringem Polabstande entstehen Schluß- und Oeffnungsfunken, bei größerem nur die letzteren. Mit dem Funkeninductor lassen sich die meisten el. Versuche anstellen. Einige besonders charakteristische sind: Bestreicht man einen Papierstreifen mit Gummilösung, streut Messingspäne darauf, und hängt den Streifen zwischen die Pole, so entsteht ein gewaltiger Blitz, dessen Länge schon auf 5^{m} gebracht wurde. — Schaltet man dünne Drähte von Kupfer, Eisen, Gold zwischen die Pole, so erhält man auf einem unter denselben festgehaltenen Papier nur noch eine schwarze oder braune Spur; Metalldrähte werden also nicht blos geschmolzen, sondern sogar verdampft. — Die Schläge eines mittleren Inductors können einen Menschen lähmen (Quet), die eines großen einen Stier tödten. — Man kann aus einem Pole Funken wie aus einem Conductor beim Annähern eines Fingers erhalten; doch entstehen nach Poggendorff in dieser Weise nur Oeffnungsfunken, während nach Einsteden ein Elektroskop, wie es dem Wechsel zwischen Oeffnungs- und Schließungsschlägen entspricht, an einem Pole abwechselnd pos. und neg. el. wird. Hieraus geht hervor, daß die Pole freie El. enthalten, daß dieselbe aber beim Schließen eine geringe, beim Oeffnen eine große Spannung hat. Die Schlagweite eines Poles wird vergrößert, wenn man den anderen leitend mit der Erde verbindet. — Von chemischen Wirkungen ist die starke Ozonbildung beim Gange des Funkenstromes durch eine mit Luft oder Sauerstoff gefüllte Röhre zu erwähnen, die aus 2 ineinander liegenden Röhren zusammengesetzt ist, von denen die entferntesten Mantelflächen mit Stanniol belegt sind, die nächsten aber Luft zwischen ihre Glasflächen fassen. Am einfachsten ist die chemische Wirkung der Inductionsströme an einem mit Jodkaliumkleister bestrichenen Papier zu erkennen, das am pos. Pol gebläut wird. — Wenn die Polspitzen einander nahe kommen, so unterscheidet man in dem Funken 2 Theile, einen hellen Lichtfaden und eine denselben umgebende Lichthülle, die Aureole; der Lichtfaden ist momentan und das Primäre der Erscheinung, die Aureole hat eine etwas längere Dauer und entsteht dadurch, daß der Funke die Luft rings um sich fortschleudert und so sehr verdünnt, daß die El. durch diesen gut leitenden verdünnten Luftraum continuirlich überfließt, bis die Entladung vollendet ist. Dies wird auch dadurch bekräftigt, daß der Lichtfaden von einem Luftstrome nicht bewegt, die Aureole dagegen fortgeweht wird; erzeugt man den Funken zwischen den Polen eines Elektrom., so bleibt der Faden ebenfalls ungeändert; die Aureole wird aber zu einer strömenden halbkreisförmigen Scheibe zusammengedrückt, welche ihre Stellung und Strömung beim Stromwechsel ändert. Noch entscheidender für die Erklärung der Aureole sind die Lichterscheinungen in den Geißler'schen Röhren, Glasgefäßen von den mannigfaltigsten Röhrenformen, in welche an zwei von einander entfernten Stellen Platindrähte eingeschmolzen, und welche entweder nahezu luftleer oder mit verdünnten Dämpfen oder Gasen von wenigen mm Spannung erfüllt sind. Schaltet man eine solche lufthaltige Röhre zwischen die Pole des Inductors ein, so erfüllt sich die ganze Röhre mit einer höchst brillanten, lebhaft beweglichen, wellenartigen Lichterscheinung. Am neg. Pole entsteht eine schön lavendelblaue Lichthülle, welche die Elektrode auf geringe Entfernung umgibt; die pos. Elektrode ist von glänzenden Funken bedeckt, von denen rothe Schichten ausgehen, die in wellenartigen Pulsationen fast die ganze Röhre erfüllen; zwischen diesem rothen Lichte des pos. und dem blauen des neg. Poles bleibt ein kurzer dunkler Raum übrig; auch die einzelnen Lichtschichten sind durch weniger helle Streifen getrennt, die auf der Längsrichtung der Röhre senkrecht stehen. Dieses Licht der Geißler'schen Röhren ist die Aureole des Funkens, während der Lichtfaden des Funkens fehlt; denn die Spectraluntersuchung zeigt, daß der Lichtfaden aus glühenden Theilchen der Elektroden, die Aureole aber aus leuchtenden Gasen und Dämpfen besteht, und das Spectrum der Geißler'schen Röhren zeigt nur die Linien der letzteren, nicht aber die der ersteren; zum Zwecke der Spectraluntersuchung benutzt man die Geißler'schen Capillarröhren, weil diese durch Concentration verstärktes Licht geben. Die Schichtung rührt nach Delarive von abwechselnden Verdünnungen und Verdichtungen der Luft her, welche durch den Strom der El. selbst entstehen und dieselbe verschieden gut leiten. In verschiedenen Gasarten ist die Farbe des Lichtes

verschieden, wird aber auch häufig durch Fluorescenz des Glases verändert, da das el. Licht zahlreiche fluorescirende Strahlen enthält; darauf beruhen prächtige Licht- und Farbenerscheinungen, die durch Einschalten verschieden fluorescirender Stoffe hervorgebracht werden; aus demselben Grunde zeigen auch manche Röhren, wahrscheinlich durch einen Schwefelgehalt erzeugte Phosphorescenz. Daß das Licht der Geißler'schen Röhren ein el. Strom durch gut leitende verdünnte Luft ist, zeigt insbesondere die Ablenkung, die der Lichtstrom durch einen M. erfährt, sowie die Rotation desselben um einen in der Röhre angebrachten Elektrom.

In den gewöhnlichen Geißler'schen Röhren geht die Gasverdünnung bis zu etwa $^1/_{1000}$; wird die Verdünnung noch weiter getrieben, bis zu $^1/_{30000}$ etwa (bei $^1/_{50000}$ soll der stärkste Strom nicht mehr durch die kürzeste Röhre gehen), so ändern sich die Lichterscheinungen nach und nach bedeutend. Nach Hittorf (1868) schwindet das rothe Anodenlicht bei fortschreitender Verdünnung immer mehr, das blaue Kathodenlicht aber breitet sich, allerdings schwächer werdend, immer weiter aus, bis dieses schwache Glimmlicht endlich die ganze Röhre erfüllt, so daß diese fast dunkel erscheint. Dieses schwache Kathodenlicht hat nun nach Hittorf folgende merkwürdige Eigenschaften: 1. Es erregt besonders starke Fluorescenz, im deutschen Glase grünen, im englischen einen blauen Schiller, nach Crookes im Smaragd eine carminrothe und im Diamant eine glänzend grüne Fluorescenz. 2. Es pflanzt sich in geraden Linien fort, erzeugt daher von jedem festen oder flüssigen Körper, der sich im Glimmlichte befindet, auf dem grünschillernden Glashintergrund einen dunkeln Schatten. Crookes hat (1879) für die meisten Hittorf'schen Erscheinungen ausgezeichnete Beobachtungsapparate, die Crookes'schen Röhren construirt; so zeigt Fig. 323 durch den Schatten d des Kreuzes b deutlich die gradlinige Fortpflanzung des von der Kathode a ausstrahlenden Glimmlichtes. Ist das Kreuz b leicht umzuwerfen, so tritt nach Crookes auf der allmälig durch Ermüdung dunkler gewordenen Hinterwand c das Kreuz d an den unermüdeten Stellen derselben heller auf. 3. Das Glimmlicht krümmt sich je nach der Stellung eines M. zu demselben hin oder von demselben weg und windet sich nach dem Gesetze der Anziehung zweier Ströme um denselben. Crookes hat diese Erscheinung nicht eingehend verfolgt und spricht blos von Hinneigung. 4. Hat die Kathode eine concave Gestalt, so concentriren sich die Glimmlichtstrahlen in einem Punkte und erzeugen eine Hitze, welche Glas und Platin schmilzt; Puluj (1881) läßt diese Concentration auf einem kleinen Kegel von Papierkohle stattfinden und erhält hierdurch eine hellleuchtende Kathodenlichtlampe. 5. Nach Crookes sollen sich zwei isolirte Glimmlichtstreifen abstoßen; doch wird diese Erscheinung bestritten. — Crookes lenkte die allgemeine Aufmerksamkeit diesem Gegenstande zu, nicht blos wegen der Eleganz seiner Apparate und der mannigfaltigen Seltsamkeit dieser Erscheinungen, sondern hauptsächlich deßhalb, weil er erklärte, sie eröffneten einen Einblick in das räthselvolle „Grenzgebiet zwischen Kraft und Materie"; die geradlinigen Glimmlichtstrahlen entstehen nach ihm dadurch, daß die Anode die neg. Luftmol. abstößt, und daß diese in geraden Linien wegen der großen Verdünnung ungehindert bis zur Glaswand u. s. w. fliegen und dort licht- und wärmeerregend wirken; da ein Gas, dessen Mol. sich nur nach einer Richtung bewegen, von einem gewöhnlichen Gase, dessen Mol. nach allen Richtungen durch einander fliegen, ganz verschieden ist, so hält er dasselbe für den „vierten Aggregatzustand", für die schon von Faraday vermuthete „strahlende Materie". Obwohl die Forscher über das Wesen der Erscheinungen noch nicht im Reinen sind, so verwerfen sie doch einstimmig die strahlende Materie; denn der Versuch 3. und das ungenügende Eintreten des Versuches 5. sprechen gegen diese Theorie, aber auch der Einwand Gintls, daß die an das Glas anprallenden neg. Mol. umkehren und dadurch den gewöhnlichen Gaszustand wieder herstellen müßten.

Fig. 323.



531 **Die magnet-elektrischen und dynamo-elektrischen Maschinen** (Pixii 1831, Gramme 1871, v. Hefner-Alteneck 1872) sind solche Maschinen, welche Arbeit durch Magneto-Induction in elektrische Ströme verwandeln. Die Maschinen älterer Construction erzeugen unterbrochene Ströme von wechselnder Richtung und geringer

Stärke; die Maschinen neuester Construction erzeugen ununterbrochene Ströme von bleibender oder wechselnder Richtung und von unbegrenzter Stärke.

Die erste Magnetinductionsmasch. wurde bald nach Faradays Entdeckung der Induction von Pixii in Paris erfunden. Sie bestand aus einem Hufeisenstahlm., der um eine Mittelachse gedreht wurde und sich dadurch einem Spulenpaar abwechselnd näherte und von ihm entfernte, wodurch in diesem Ströme inducirt wurden. Mehr Verbreitung gewann Stöhrers Maschine (Fig. 324), die auch jetzt noch zu medicinischen Zuckungen verwendet wird. In dieser hat der Hufeisenstahlm. NS eine feste Lage und die Spulen C und D drehen sich vermöge der Kurbel um die Achse AA gegen die Pole N und S hin. In den Spulen stecken zwei Kerne von weichem Eisen, welche durch die schmiedeeiserne Platte BB verbunden sind und dadurch ein Hufeisen ohne Ms. bilden. Wenn bei der Drehung der Kurbel sich die Spulen den Polen nähern, so entstehen in denselben Inductionsströme, die jedoch wegen der großen Entf. der Spulen von den Polen nur schwach sein können. Verstärkt werden sie durch die Wirkung der Eisenkerne. Beim Annähern der Spulen nähern sich natürlich auch die Eisenkerne und werden dadurch M. Entstehender Ms. aber erzeugt bekanntlich ebenfalls Inductionsströme und zwar von derselben Richtung wie die Annäherung der Spulen; diese beiden Arten der magn. Induction verstärken sich demnach. Ebenso entstehen bei der Entf. der Spulen von den Polen Inductionsströme, zunächst weil die Spulen sich entfernen, hauptsächlich aber, weil der Kernms. verschwindet, und da auch diese beiden Inductionsströme von gleicher Richtung sind, so verstärken sie sich ebenfalls. Aber die Inductionsströme des verschwindenden Ms. und des Entfernens sind von entgegengesetzter Richtung zu den Inductionsströmen des entstehenden Ms. und des Annäherns. Sowie also demnach die Spulen an den Polen vorbeigegangen sind, wechselt die Richtung der Inductionsströme in dem Spuldraht. Es muß daher eine Einrichtung vorhanden sein, welche die Wirkung hat, die Richtung der nach außen z. B. in die Handhaben P und Q fließenden Ströme zu erhalten, eine Einrichtung, die man **Commutator** nennt. Derselbe besteht bei dieser Constr. aus den Gabeln H und K und dem auf der Achse sitzenden doppelten Nasenringe F. In Fig. 325 ist der Ring im Durchschnitte dargestellt; er enthält eine auf der Achse sitzende Messingröhre rr mit zwei halbkreisförmigen Nasen nach entgegengesetzten Richtungen an beiden Stirnflächen; diese Messingröhre umschließt eine Elfenbeinröhre (in Fig. 325 schwarz), und diese wird von einer kürzeren Messingröhre r′ umfaßt, die ebenfalls 2 halbkreisförmige Nasen an ihren Stirnflächen hat, die nach entgegengesetzten Richtungen hinausragen wie die Nasen der inneren längeren Röhre. Auf diesen Nasen schleifen die Zinken der zwei Gabeln H und K und zwar der Art, daß immer die eine Zinke einer Gabel die betreffende Nase berührt, wenn die andere frei in der Luft schwebt, und zwar deßhalb, weil je 2 neben einander liegende Nasen nach entgegengesetzten Richtungen hinausstehen. Nun ist das eine Spuldrahtende m mit dem inneren Ringe, das andere n mit dem äußeren Ringe verbunden, und diese Ringe sind so auf die Achse gesetzt, daß im Moment des Stromwechsels die eine Gabelzinke z. B. 1 ihre Nase verläßt und die andere 2 jetzt ihre Nase berührt. Hat also z. B. bisher das Drahtende m an den inneren Ring r und an die Gabel H pos. El. geführt, so würde ohne den Commutator vom Moment des Stromwechsels an dasselbe Ende neg. El. an die Gabel H hinführen. Da aber in diesem Augenblicke die Zinke 1 den inneren Ring verläßt, die Zinke 2 aber den äußeren berührt, so ist jetzt die Gabel H mit dem äußeren Ringe r′ in Verbindung, der bisher von dem Drahtende n neg. El. empfing, vom Moment des Stromwechsels an dagegen pos. El. erhält, so daß durch die Gabel H immer pos. El. an die Handhabe P gelangt. Solcher Commutatoreinrichtungen, welche die Stromrichtung erhalten, gibt es noch mancherlei; sie haben alle den Nachtheil der Funkenbildung und dadurch auch der Stromschwächung; denn z. B. bei der eben

Fig. 324.

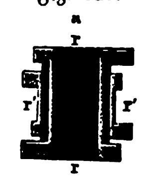
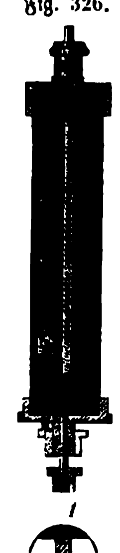


Fig. 325.

geschilderten Einrichtung tritt bei jedem Abgange einer Zinke von ihrer Nase eine Stromunterbrechung ein, mit welcher bekanntlich immer ein Funken entsteht. Dieser verzehrt nicht nur einen Theil des Stromes, sondern kann bei starken Strömen die Berührungsstellen schmelzen und an einander schweißen. Ein zweiter Nachtheil dieser wie aller älteren Constr. ist die Nothwendigkeit der Stahlmagnete, da diese schon an sich, noch mehr aber durch die an einer Masch. unvermeidlichen Erschütterungen an Kraft abnehmen, wodurch ihre inducirende Wirkung geschwächt werden muß. Der dritte und Hauptnachtheil derselben ist aber die stete Unterbrechung des Stromes. In der ganzen Zeit der Drehung nämlich, wo die Spulen C und D weit von den Polen N und S entfernt sind, können die Inductionsströme nur bis zum Verschwinden schwach sein; erst wenn die Spulen ganz in die Nähe dieser Pole heranrotiren, können Ströme von nutzbarer Stärke entstehen; es sind daher die von sämmtlichen älteren Masch. gelieferten Ströme durchaus nicht von gleichmäßigem Flusse wie die Batterieströme, sondern es sind durch Pausen unterbrochene Stromstöße. Das Verdienst, den ersten und dritten Nachtheil der alten Masch. beseitigt zu haben, gebührt Gramme und v. Hefner-Alteneck; der zweite Nachtheil wurde durch Einführung des dynamo-elektrischen Princips von W. Siemens beseitigt, der auch schon früher den dritten Nachtheil stark reducirt hatte.

Siemens hatte nämlich (1850) schon ein neues Element in die Magnetinductionsmaschinen eingeführt, nämlich den Inductionscylinder (Fig 326) von weichem Eisen, der beiderseits tiefe, breite, fast bis an die Achse gehende Nuthen enthält, wie der Querschnitt A zeigt, die mit zahlreichen der Länge des Cyl. entlang ziehenden Kupferdrahtwindungen ausgefüllt sind. Dieser dünne Cyl. vertritt die Stelle der Inductionsspulen, kann aber eben wegen seiner geringen Dicke zwischen die Pole eines M. gebracht werden, und zwar sind so viele Hufeisenstahlm. hinter einander aufgestellt, daß die ganze Länge des Inductionscyl. von Polen umfaßt ist. Wegen der größeren Nähe des Inductionscyl. an den Polen und wegen seiner rascheren Drehbarkeit sind die in dem Drahte desselben inducirten Stöme viel stärker als bei den älteren Masch.; außerdem bewirken die genannten zwei Umstände viel kürzere Unterbrechungszeiten. Obwohl nun der Inductionsstrom des Siemens'schen Cyl. kein ganz constanter ist, und trotz der Nothwendigkeit eines Commutators und der Stahlm., hat dennoch der Siemens'sche Cyl. die Inductionsmaschinen bedeutend vervollkommnet; in vielen Tausenden von Exemplaren wird derselbe in den Läute-Inductoren benutzt, welche entfernte Eisenbahnstationen von der Ankunft eines Zuges unterrichten, und in der magnet-elektrischen Maschine von Wilde (1867) fand er Eingang in die Großindustrie. Diese Masch. (Fig. 327) enthielt zwei oder gar drei Inductionscyl. Der kleinste E rotirte mittels einer Dampfmasch. zwischen den Polflächen eines längeren Magazins A von Hufeisenstahlm. und erzeugte so el. Ströme, die in einem dicken Drahte um 2 große parallele und durch eine dritte Platte verbundene schmiedeeiserne Platten B gingen und diese so zu einem Elektrom. machten; zwischen den Polschenkelenden desselben rotirte mittels der Schnüre D′ durch die Dampfmaschine ein zweiter Inductionscyl. E′, in dessen Draht dann die nutzbaren, viel stärkeren Inductionsströme entstanden. In einer besonders großen Ausführung seiner Masch. ließ Wilde die Ströme des zweiten Cyl. noch um einen zweiten, größeren Elektrom. gehen, zwischen dessen Polschenkelenden ein dritter, noch größerer Cyl. rotirte, dessen Inductionsströme dann zu großartigen el. Wirkungen dienten: das durch dieselben erzeugte Kohlenlicht blendete wie die Mittagssonne und ließ Gasflammen matt braun erscheinen; eine die Strahlen desselben vereinigende Sammellinse brannte Löcher in Papier und machte die Wärme noch in 50m Entf. fühlbar; eine mehrere m lange Eisendrahtschlinge war schon nach wenigen Min. geschmolzen, eine kurze Eisenstange, ja selbst ein fingerdicker und meterlanger Platindraht schmolzen in blendender Weißgluth zusammen. Trotz der Vorzüge des Siemens'schen Cyl. hielten sich diese Wilde'schen Masch. in der Industrie nicht; die Nothwendigkeit eines Commutators erzeugte starke Funken, und die Stromkraft, die an diesen Funken nicht gänzlich neutralisirt werden konnte, verwandelte sich in den Spuldrähten in Wärme, ja in Gluth, wodurch die Drähte verdarben.

Fig. 326.

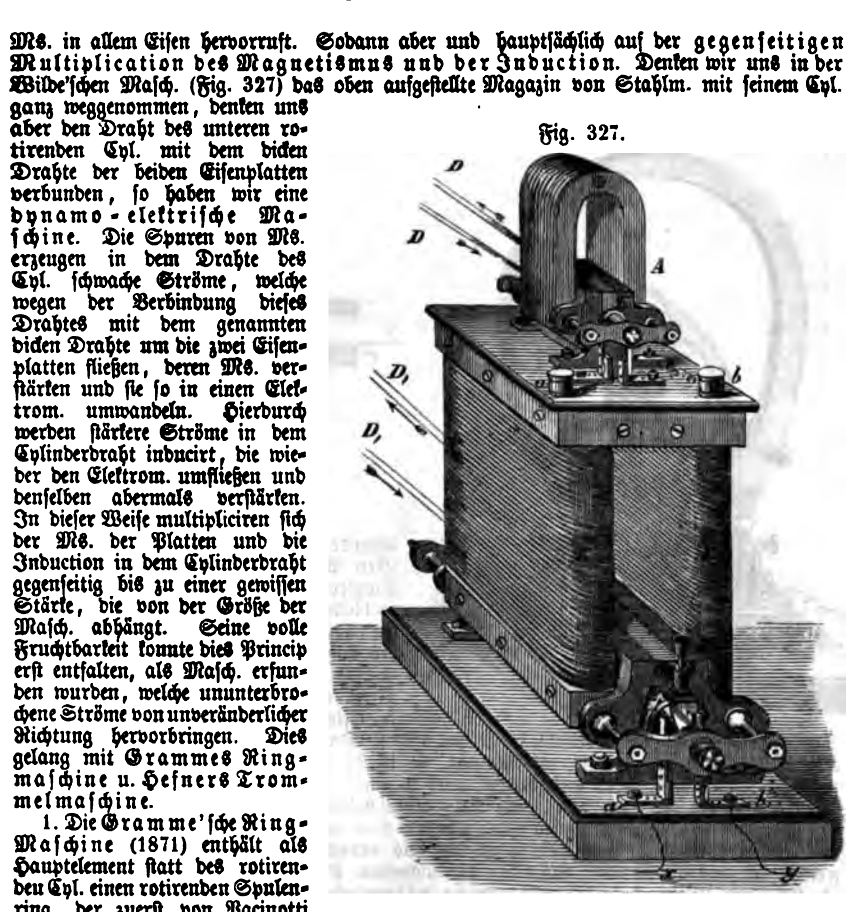


Noch fruchtbarer erwies sich die zweite neue Idee, welche Siemens (1866) in die magnet-el. Masch. einführte, das dynamo-elektrische Princip, welches die Nothwendigkeit der Stahlm. beseitigte und eine fast grenzenlose Steigerung der Stromstärke der Masch. und dadurch allein deren Anwendung im Großen ermöglichte. Dieses Princip beruht zunächst auf dem elektromagnetischen Residuum, der Erscheinung, daß in jedem einmal magn. gewesenen Eisen eine Spur von Ms. zurück bleibt, und daß die Erde Spuren von



Ms. in allem Eisen hervorruft. Sodann aber und hauptsächlich auf der gegenseitigen Multiplication des Magnetismus und der Induction. Denken wir uns in der Wilde'schen Masch. (Fig. 327) das oben aufgestellte Magazin von Stahlm. mit seinem Cyl. ganz weggenommen, denken uns aber den Draht des unteren rotirenden Cyl. mit dem dicken Drahte der beiden Eisenplatten verbunden, so haben wir eine dynamo-elektrische Maschine. Die Spuren von Ms. erzeugen in dem Drahte des Cyl. schwache Ströme, welche wegen der Verbindung dieses Drahtes mit dem genannten dicken Drahte um die zwei Eisenplatten fließen, deren Ms. verstärken und sie so in einen Elektrom. umwandeln. Hierdurch werden stärkere Ströme in dem Cylinderdraht inducirt, die wieder den Elektrom. umfließen und denselben abermals verstärken. In dieser Weise multipliciren sich der Ms. der Platten und die Induction in dem Cylinderdraht gegenseitig bis zu einer gewissen Stärke, die von der Größe der Masch. abhängt. Seine volle Fruchtbarkeit konnte dies Princip erst entfalten, als Masch. erfunden wurden, welche ununterbrochene Ströme von unveränderlicher Richtung hervorbringen. Dies gelang mit Grammes Ringmaschine u. Hefners Trommelmaschine.

Fig. 327.



1. Die Gramme'sche Ring-Maschine (1871) enthält als Hauptelement statt des rotirenden Cyl. einen rotirenden Spulenring, der zuerst von Pacinotti (1860) in einer el.-magn. Kraftmasch. angewendet worden war, aber wohl von Gramme auch selbständig erfunden wurde. Dieser Spulenring ist in der Mitte des unteren Theiles der Gramme'schen Handmasch. (Fig. 328) sichtbar und rotirt dort mittels Räder und Kurbel zwischen den unteren Enden, den Polen eines hohen hufeisenförmigen Lamellenstahlm. nach Jamin. Er besteht aus einem Eisenringe, auf welchem 30 Drahtspulen eng neben einander aufgesetzt sind. In der Fig. sind die Spulen durch abwechselnd schwarze und weiße Schraffirung hervorgehoben, wodurch auch angedeutet ist, daß die Drahtwindungen der einzelnen Spulen radial aus- und einwärts um den ringförmigen Eisenkern gezogen sind. Die weitere Einrichtung des Ringes ist aus der Schnittfigur 329 ersichtlich. Der Eisenkern mit seinen Spulen rr ist durch die sogenannten Strahlstücke abc mit der Drehachse verbunden. Jedes der 30 Strahlstücke abc beginnt an der Hinterseite des Ringes an einer Stelle a, wo der Draht der einen Spule endigt und der Draht einer folgenden beginnt, und ist mit diesen 2 Drahtenden zusammengelöthet, so daß alle Spulen einen einzigen zusammenhängenden Draht bilden. Von hier geht jedes Strahlstück radial bis an die Achse, biegt sich dann senkrecht um und geht parallel zur Achse des Ringes durch denselben und noch eine Strecke über die Vorderseite desselben hinaus bis c. Alle Strahlstücke sind durch eine nicht leitende Masse von einander und von der Achse isolirt und in ein compactes Ganzes verbunden. Die zur Achse parallelen Theile bilden einen Hohlcyl. um dieselbe, auf welchem, wie Fig. 328 erkennen läßt, oben und unten zwei wagrechte, aus Metalldrähten lose zusammengesetzte, Besen oder Bürsten schleifen, die links und rechts mit Messingständern verschraubt sind, an denen sich Klemmschrauben zur Aufnahme der die Ströme fortführenden Leitungsdrähte befinden. Die in den Spulen erregten Ströme werden von den Strahlstücken aufgenommen und durch die Besen an jene Klemmschrauben geführt. Um die Entstehung der Ströme zu erkennen, muß auf

die Wirkung eingegangen werden, welche die Pole des Lamellenstahlm. in dem rotirenden Eisenringe hervorbringen. Offenbar erhält die Stelle des Eisenringes, welche an dem Nordpole des Lamellenm. vorbeigeht, durch magn. Influenz einen Südpol und die gegenüberliegende Stelle einen Nordpol. Obwohl nun jeden Augenblick zwei andere Stellen des Ringkerns diesen Nord- und Südpol bilden, so bleiben doch diese beiden Pole immer an derselben Stelle der Masch., nämlich an den äußersten Stellen links und rechts des Ringes zunächst den Polen des Lamellenm. Die Wirkung ist demnach dieselbe, als ob der Ringkern stillstände und als ob seine Spulenhülle unaufhörlich über ihn fortkreisen würde. Da der Ringkern links und rechts Pole, also oben und unten Indifferenzzonen hat, so ist er eigentlich ein ringförmiger Doppelmagnet; wir müssen daher untersuchen, was in einer schmalen Spule vorgeht, wenn dieselbe über einen M. nach dem einen Pole hingeschoben wird und dann weiter geht über einen zweiten M., der mit seinem gleichnamigen Pole an diesen Pol stößt. Dabei benutzen wir Ampères Theorie, nach welcher ein M. aus parallelen Kreisströmen besteht, und nach welcher in zwei an einander stoßenden gleichnamigen Polen, wie die Zeiger zweier gegenüberstehenden Uhren, diese Elementarströme entgegengesetzt kreisen. Geht die Spule über einen solchen Doppelpol hin, so entfernt sie sich von allen Elementarströmen des einen M., wodurch in derselben ein Strom von gleicher Richtung inducirt wird; gleichzeitig nähert sie sich aber auch ebenso vielen aber entgegengesetzt gerichteten Elementarströmen des anderen M., wodurch in ihr ein Strom von entgegengesetzter Richtung dieser entgegengesetzt gerichteten Ströme, also ein Strom von derselben Richtung inducirt wird; ein Doppelpol verstärkt also die Inductionsströme. Geht nun die Spule über den Doppelpol hinaus auf den zweiten M., so bleibt die Stromrichtung ungeändert, die Intensität aber nimmt ab; denn wir entfernen uns dann immer noch von allen Elementarströmen des ersten M., der gleich gerichtete Entfernungsstrom desselben bleibt, wird aber schwächer, weil der Abstand der Spule von demselben wächst. Wir nähern uns auch noch immer den meisten Elementarströmen des zweiten M., so daß auch der zweimal entgegengesetzt und darum gleich gerichtete Näherungsstrom desselben erhalten bleibt; aber wir entfernen uns auch bald von einem Theile dieser Ströme, so daß ein entgegengesetzt gerichteter Inductionsstrom entsteht, der den gleich gerichteten schwächt. Diese Schwächung nimmt zu, je näher wir der Indifferenzzone des zweiten M. kommen; der erste M. verliert bald jeden Einfluß, da der Abstand der Spule von demselben zu groß wird; die Zahl der Elementarströme des zweiten M., denen sich die Spule nähert, wird immer kleiner, und die Zahl der Elementarströme, von denen sie sich entfernt, immer größer, so daß der Inductionsstrom immer schwächer wird, aber seine Richtung behält. Endlich in der Indifferenzzone nähert sich die Spule genau eben so vielen Elementarströmen, als sie sich von solchen entfernt, da der erste M. jetzt ganz ohne Einfluß ist. In der Indifferenzzone entsteht daher kein Strom, aber es findet Stromwechsel statt. Denn sowie die Spule über diese Stelle hinaus ist, entfernt sie sich von mehr Elementarströmen des zweiten M., als sie sich solchen nähert; es entsteht daher in ihr ein Inductionsstrom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des zweiten M., also ein Inductions-

Fig. 328.

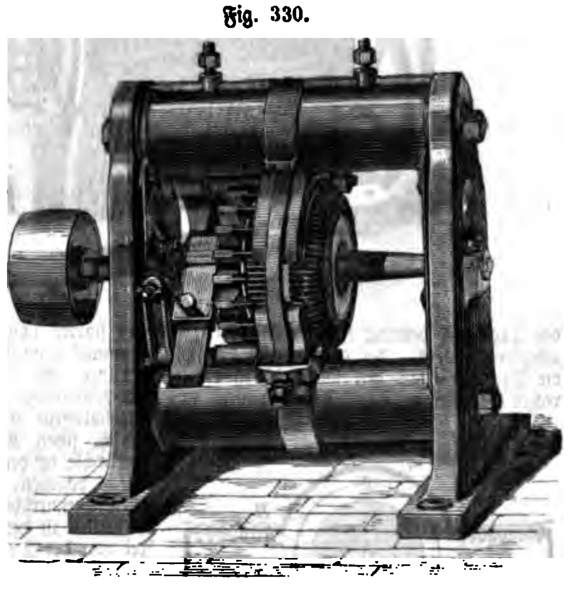


Fig. 329.



strom von entgegengesetzter Richtung wie bisher, der fortwährend zunimmt, bis er auf dem zweiten Doppelpole seine größte Stärke erreicht. Wenden wir diese Betrachtung auf alle Spulen des Gramme'schen Ringes (Fig. 328) an, so erhalten wir als Resultat: Alle Spulen der rechten Hälfte des Ringes erzeugen unaufhörlich gleich gerichtete Ströme, die, weil sie dem rechten Besen am nächsten sind, alle durch diesen abfließen, und alle Spulen der linken Hälfte erzeugen unaufhörlich Ströme von entgegengesetzter Richtung, die, weil sie dem linken Besen am nächsten sind, alle durch diesen abfließen. Hierdurch erklärt es sich, warum der Strom des Gramme'schen Ringes von gleichbleibender Richtung ist. Die beiden Besen und Ständer der Gramme'schen Masch. verhalten sich wie die beiden Pole einer Batterie, durch welche ebenfalls entgegengesetzte Ströme constant abfließen. Da wegen der Vielheit der Spulen über die beiden Doppelpole unaufhörlich Spulen rotiren, da kein Moment eintritt, wo keine Spule über einen Pol geht, so erklärt sich, warum der Strom der Gramme'schen Maschine ununterbrochen ist. Die kleine Handmasch. (Fig. 328), welche für manche Schulversuche und medicinische Zwecke ausreicht, ist natürlich für industrielle Zwecke nicht brauchbar; Masch. für solche Zwecke haben übrigens dieselbe Einrichtung des Ringes; nur wird derselbe durch eine Dampfmasch. oder einen anderen Motor mittels eines Riemens und der Rolle links an Fig. 330 in so rasche Rotation versetzt, daß er Tausende von Umdrehungen in 1 Minute macht. Wegen dieser großen Triebkräfte kann bei solchen Masch. das dynamo-el. Princ. zur Anwendung kommen. Der Elektrom. ist hier durch die dicken, eisernen Walzen oben und unten ersetzt, die in dieser für Galvanoplastik bestimmten Masch. nicht von dicken Kupferdrähten, sondern nur von Kupferblechen umgeben sind; durch diese gehen die Ringströme, wandeln dadurch die Eisenbarren in M. um, und gehen dann weiter zu der Nutzstelle. In den Gramme'schen Lichtmaschinen, die ganz ähnlich sind, gehen dagegen die Ringströme in zahlreichen Kupferdrahtwindungen um die 2 Eisenbarren, so daß dieselben eher den gewöhnlichen Elektrom. gleichen.

Fig. 330.



Die Leistungen dieser dynamo-el. Masch. sind großartig, während die der magnet-el. Handmasch. nicht völlig genügen, z. B. einen Platindraht von $\frac{1}{3}$ mm Dicke und 2 dm Länge nur zur Rothgluth bringen und in einer Min. etwa 20 ccm Knallgas entwickeln, außerdem aber wegen der Anwendung von Stahlm. die Gefahr allmäliger Schwächung darbieten. Indessen werden jetzt auch dynamo-elektrische Handmaschinen sowohl mit Grammes Ring als auch mit Hefners Trommel für den Schulgebrauch u. a. Kleinbetrieb gebaut. — Die Ringmasch. haben den speciellen Nachtheil, daß nur die Außenseiten der Spulen im magn. Felde rotiren, während die übrigen Seiten wirkungslos sind, aber die Strombahn unnütz verlängern und so den Leitungswiderstand vergrößern. Hierdurch wird die unvermeidliche Erhitzung der Drähte, jene Unvollkommenheit aller el. Masch., welche die Steigerung der Stromstärke ins Unbegrenzte nicht zuläßt, bei der Gramme'schen Masch. ansehnlich erhöht. An diesem speciellen Nachtheile der Gramme'schen Masch. leidet die folgende Masch. viel weniger.

2. Die Trommelmaschine von v. Hefner-Alteneck liefert wie die von Gramme einen constanten Strom von unveränderlicher Richtung; sie wird auch wie jene sowohl als Handmasch. mit permanenten M. wie auch für Motorenbetrieb mit Anwendung des elektrodynamischen Princips gebaut. Fig. 331 stellt die Handmasch. dar, welche an Stärke die von Gramme weit übertrifft. Dieselbe enthält oben und unten 24 parallel hinter einander aufgestellte, spitzwinkelige Stahlm., welche die Trommel, das Hauptelement der Hefner'schen Masch. fast ganz umschließen. In dieser Trommel befindet sich ein Eisenkern und auf den

Mantel der Trommel sind die Inductionsdrähte gezogen, jedoch nicht der Quere nach um die Trommel gewickelt, sondern der Länge nach aufgewunden. Hierdurch ist der Nachtheil beseitigt, daß die Spuldrähte nur in einem kleinen Theile ihrer Länge Induction erfahren; vielmehr ist fast die ganze Drahtlänge, mit Ausnahme der über die beiden Stirnflächen der Trommel hinlaufenden Theile, der Wirkung des Ms. ausgesetzt, wodurch sich die überwiegend kräftige Wirkung dieser Masch. erklärt und eine Wärmequelle fast wegfällt. Innerhalb

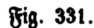
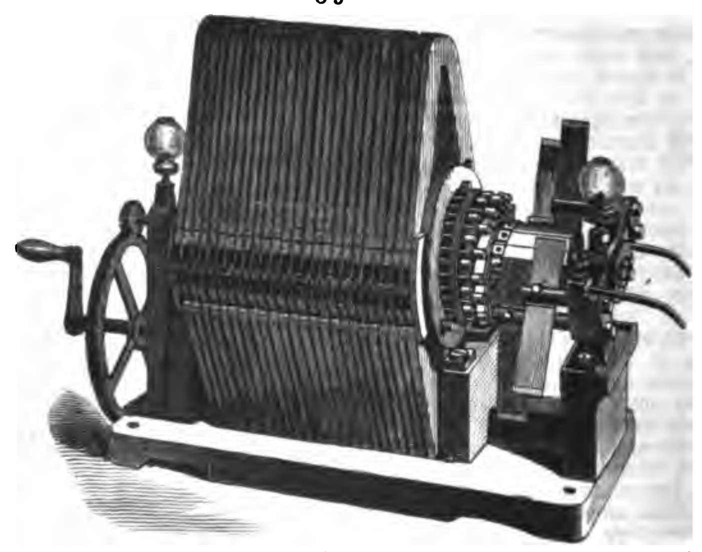
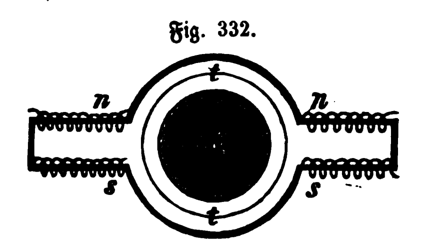


Fig. 331.



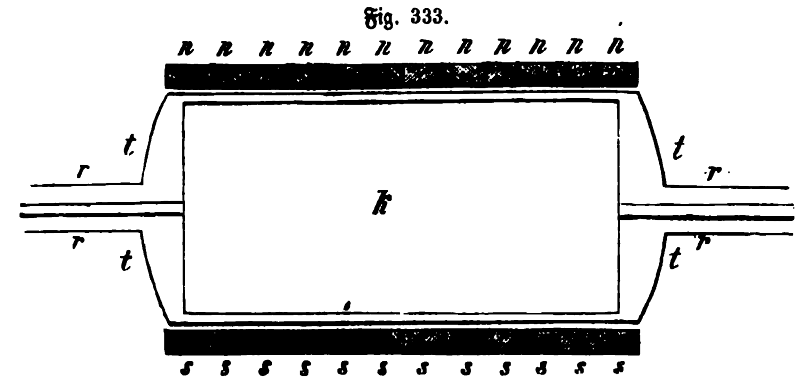
der Trommel befindet sich der Eisenkern, ein aus starken schmiedeeisernen Tafeln zusammengesetzter Hohlcyl., der concentrisch von der Trommel umgeben ist und zwar so nahe, daß die Trommel fast den Mantel dieses Kernes bildet. Bei der Handmasch. (Fig. 331) ist rechts ein kleiner Theil der Trommel mit den Ableitevorrichtungen sichtbar, der von ihr eingeschlossene Kern natürlich nicht; in dieser Masch. sitzen Kern und Trommel auf einer Drehachse, bei den Hefner'schen dynamo-el. Großmasch. dagegen, von denen Fig. 332 und 333 einen schematischen Quer- und Längsdurchschnitt darstellen, ist der Kern k unbeweglich und ganz frei von der Trommel t, welche sich allein mit ihrer Bewickelung um den Kern dreht; dadurch wird die Entstehung von Foucault'schen Strömen und der Polwechsel im Eisenkern vermieden, die bei anderen Masch. zur Erhitzung beitragen. Kern und Trommel sind bei den Hefner'schen Masch. von bedeutender Länge und sind, wie der Längenschnitt (Fig. 333) erkennen läßt, auf ihrer ganzen Länge der inducirenden Wirkung von Elektrom. ausgesetzt. An jeder Stelle der ganzen Trommellänge befindet sich links ein Hufeisen ns und rechts eines ns (Fig. 332) und zwar sind dieselben so aufgestellt, daß sie ihre Schenkelenden gegen einander wenden; diese Schenkelenden sind oben und unten durch bogenförmige Eisenstücke nn und ss mit einander verbunden. Alle Schenkel der Hufeisen sind von einem einzigen Drahte umwunden, der mit dem Trommeldrahte in Verbindung steht. Wenn daher durch Spuren von Ms. des Eisenkerns in dem Trommeldrahte el. Ströme inducirt werden, so fließen dieselben auch um die Hufeisenschenkel und wandeln dieselben in Elektrom. um; diese verstärken durch Influenz den Ms. des Eisenkerns, wodurch wieder die Inductionsströme im Trommeldrahte intensiver werden, so daß nach dem dyn.-el. Princip die Elektrom. und der Eisenkern immer stärker magn. und die Inductionsströme in den Drähten immer intensiver werden. Die Bewickelung der Elektrom. ist so eingerichtet, daß die oberen Schenkelenden der Hufeisen Nordpole n und die unteren Südpole s enthalten; da nun die Eisenbogen immer gleichnamige Pole verbinden, so sind die oberen Bogen überall besonders stark nordmagn.

Fig. 332.



und die unteren ebenso stark südmagn., und durch Influenz wird in den benachbarten weiten Oberflächentheilen des Kerns ebenfalls starker Ms. erregt. Diese nahe Umschließung der Trommel und ihres Drahtes durch große Magnetpolflächen auf ihrer ganzen Länge ist die zweite Hauptursache der colossalen Wirkung dieser Masch. Wie die Trommeldrähte in 16

Fig. 333.



Abtheilungen aufgewunden sind, und wie diese ihre Ströme an einen Stromsammler und an 2 Besen leiten, ist einigermaßen aus Fig. 331 ersichtlich, kann aber hier nicht ausführlich betrachtet werden; nur ist zu erwähnen, daß die Hefner'sche Maschine nicht blos stärker, sondern auch freier von Funken und Erhitzung ist, als die Masch. von Gramme. Eine perspectivische Ansicht der ganzen Masch. enthält die Fig. 334 rechts unten.

Die zahlreichen Constructionen von el. Masch., die seit der Erfindung von Grammes Ring und Hefners Trommel in den letzten 10 Jahren noch aufgestellt wurden, sind mehr oder weniger Modificationen jener ersten Masch. zu speciellen Zwecken; dieselben lassen sich der Uebersicht wegen wohl eintheilen, jedoch entsteht hierdurch keine scharfe Scheidung. Benutzt man bei der Eintheilung die Einrichtung des Ankers oder der Armatur, wie man jetzt den Maschinentheil nennt, in welchem die Ströme inducirt werden, so unterscheidet man Ringmaschinen, Trommelmaschinen und Spulmaschinen. In den Ringmaschinen ist die Armatur irgend eine Modification des Pacinotti-Gramme-Ringes oder eine Verbindung mehrerer Ringe, in den Trommelmaschinen ist sie der Hefner'schen Trommel mehr oder weniger ähnlich, und in den Spulenmasch. rotiren in dem magn. Felde Spulen; wenn dieselben keinen Eisenkern enthalten, wie z. B. in der großen Siemens'schen Lichtmaschine (Fig. 334), so hat dies den Vorzug, daß die Foucault'schen Ströme und der Polwechsel, also auch die hiermit entstehende Erhitzung der Eisenkerne wegfallen. — Benutzt man bei der Eintheilung den inducirenden Magnet, so unterscheidet man magnetelektrische und dynamoelektrische Maschinen (Dynamo-Maschinen oder kurzweg Dynamo), erstere haben Stahlmagnete, letztere Elektromagnete. Die Dynamo theilt man jetzt ein in Hauptschluß-, Nebenschluß- und Compoundmaschinen. Man nennt eine Dynamo Hauptschlußm., wenn in den Stromkreis der Armatur nicht bloß der Receptor, in welchem der Strom eine Arbeit leisten soll, z. B. eine Anzahl el. Lampen, ein galvanoplastischer Apparat oder drgl. eingeschaltet sind, sondern auch noch die inducirenden Elektromagnete, wenn also der Armaturstromkreis, der Arbeitsstromkreis und der der Elektrom. einen einzigen Stromkreis bilden, wie es ja bei der älteren, reinen Dynamo vorausgesetzt ist. Dies hat den Erfolg, daß der Strom schwächer wird, wenn im Arbeitsstromkreis der Widerstand wächst, weil das Ohm'sche Gesetz auch für die el. Masch. Geltung hat; da der Strom schwächer wird, so werden auch die Elektromagnete schwächer, wodurch die Stromstärke noch weiter herabsinkt, während doch eben beim Wachsen des Widerstandes zur Ueberwindung desselben ein stärkerer Strom zur Verfügung stehen müßte. Daraus folgt, daß die Hauptschlußmaschine nur bei einem constanten Widerstande anwendbar ist; so hat die Hauptschlußmaschine (Fig. 334 rechts unten) nur den Strom zur Speisung der Elektrom. in der großen Lichtmaschine zu liefern, wozu sie vollkommen ausreicht. Ist aber der Widerstand veränderlich, so kann nach Wheatstone die Nebenschlußmaschine den Strom dennoch in seiner nothwendigen Stärke wieder herstellen; der Arbeitsstromkreis und der Armaturstromkreis bilden einen Stromkreis, die Elektrom. aber werden von einer Zweigleitung gespeist; wird nun der Widerstand im Hauptstromkreis größer, so wird der Strom der Zweigleitung nach den Gesetzen der Zweigströme stärker, wodurch auch die Elektromagnete verstärkt werden und so die Schwächung des Hauptstromes beseitigen. Dies hat aber z. B. bei der Auslöschung der

meisten Glühlichter in einem Stromkreise den Erfolg, daß die übrigen heller und hell leuchten und schließlich durch zu starke Gluth zerstört werden. Während also mit der Hauptschlußmaschine bei Verstärkung des Widerstandes die übrigen Lichter ausgehen, brennen sie in der Nebenschlußmaschine zu stark; man hat daher beide Schluß- oder Schaltungsweisen zu componiren versucht und ist dadurch zu der Compoundmaschine gelangt, die mehreren Ingenieuren (1882) fast gleichzeitig gelungen ist; man nennt sie auch Maschine von constanter Klemmenspannung, weil sie trotz aller Widerstandschwankungen dieselbe el. Spannung an ihren Polklemmen hat. Die Siemens'sche Masch. mit constanter Klemmenspannung hat dasselbe Aussehen, wie seine ältere reine Dynamomasch. (Fig. 334 rechts unten); nur bemerkt man in der Mitte der Elektromagnetenlänge Trennungsleisten und sieht dann, daß die eine Hälfte der Elektrom. mit dünnem Drahte (1mm), die andere mit dickem Drahte (3mm) bewickelt ist. Der dicke Draht ist der des Hauptstromkreises, in den auch die Armatur und der Receptor (Stromempfänger) eingeschaltet sind; es ist dies also der Draht der Hauptschlußmaschine. Der dünne Draht aber ist die von den Bürsten ausgehende Zweigleitung des Nebenschlusses. In der Compoundmaschine sind also die beiden ersten Dynamo vereinigt. Bei anderen Constructionen sind die beiderlei Drähte auf einander gewickelt, oder eine Reihe von Elektrom. hat den dicken Draht, die andere den dünnen u. s. w. Alle Masch. mit gemischter Schaltung haben den Vorzug, selbstthätig ihre Leistungen von den Schwankungen des äußeren Widerstandes unabhängig zu erhalten. Manche Constructionen erreichen die Constanz durch Verbindung der Masch. mit einem besonderen Stromregulator, oder durch Speisung der Elektrom. mit einer eigenen Stromquelle u. s. w. — Benutzt man bei der Eintheilung der Masch. die Stromrichtung, so unterscheidet man Gleichstrommaschinen und Wechselstrommaschinen; in manchen Fällen z. B. für Jablochkoff'sche Kerzen sind Wechselstrommaschinen unbedingt nöthig, in anderen können sie mit demselben Erfolge dienen wie die Gleichstrommaschinen. Fig. 334 stellt eine vortreffliche Maschine von Siemens und Halske dar, die in dieser Einrichtung als Wechselstrommaschine wirkt, jedoch auch durch Commutatoren eine Gleichstrommaschine von verschiedener Stärke werden kann. Die Hauptbestandtheile derselben sind die Elektromagnete CN u. CS, die in der Zahl von 8, 12, 16 u. s. w. an den starken Gestellschildern B so befestigt sind, daß je 2 gegenüberliegende Pole entgegengesetzt sind, wie die Buchstaben N u. S andeuten, und durch Speisung aus der Trommelmaschine rechts unten eine starke Polarität erhalten. In dem engen Zwischenraume entsteht ein starkes magnetisches Feld, durch welches die Spulen D ohne Eisenkerne mittels einer gemeinsamen Achse rotiren. — Endlich theilt man die el. Masch. auch nach ihrem Zwecke ein in Lichtmaschinen, galvanoplastische Maschinen u. s. w., da sie nach ihrer Verwendung Verschiedenheiten in manchen Bestandtheilen haben müssen. So ist die Gramme'sche Ringmaschine (Fig. 330) für galvanoplastische Arbeiten gebaut; da nämlich nach Folgerung 9 aus Ohms Gesetz das Max. der Stromstärke erreicht wird, wenn der innere Widerstand dem äußeren gleich ist, und da dieser hier nicht sehr groß ist, so darf es auch jener nicht sein; deßhalb sind die Elektromagnete mit breiten Kupferplatten umwunden, während sie in den Lichtmaschinen mit zahlreichen Drahtwindungen bewickelt sind.

Fig. 334.

Eine andere nützliche Verwendung der Magnetinduction ist der *Minenzünder* (1867); Breguets Minenzünder besteht aus einem Magazin von einigen Hufeisenstahlm., an dessen Pole weiche Eisenkerne mit Inductionsspulen angeschraubt sind, deren Drähte mit der Patrone verbunden werden. An den weichen Eisenkernen liegt ein Anker an; in dem Moment, wo derselbe losgerissen wird, entstehen kräftige Inductionsfunken. Dieselben erscheinen sicherer und sind viel einfacher zu erzeugen, als mit Ruhmkorffs Inductor.

532 *Weniger wichtige Inductionserscheinungen* sind: 1. Die *Inductionsströme höherer Ordnung*, d. h. solche Str., welche durch Inductionsstr. in benachbarten Spulen erregt werden und sowohl physiologisch als durch ein Galvanometer nachgewiesen werden können. — 2. Die *Induction durch den Erdmagnetismus*, welche Faraday (1832) an der Ablenkung einer Galvanometernadel wahrnahm, als eine Spule aus der Richtung der Inclination rasch um 180° gedreht wurde; bringt man in die Spule einen weichen Eisenkern, so kann man starke Str. erhalten; Weber (1854) benutzte diese Str. zur genauen Bestimmung der Inclination eines Ortes; in einer horiz., rasch um 180° gedrehten Spule wird ein Strom durch die vert. Componente $R \sin i$ des Erdms. erregt, und in einer vert. rasch um 180° gedrehten Spule durch die hor. Comp. $R \cos i$; da die Stromintensitäten s diesen Kräften proportional sind, so ist $\tan i = s/s'$, woraus man i finden kann. — 3. Die *unipolare Induction* ist eine Induction in Leitern, in Bezug auf welche die Magnetkraft sich nicht ändert, während bei der gewöhnlichen Magnetinduction der Ms. sich entweder durch Nähern oder Entfernen in Bezug auf den Leiter vergrößert oder verkleinert, oder dasselbe durch Entstehen oder Verschwinden, Verstärken oder Schwächen thut. Solche unipolare Induction kann man wahrnehmen an Plückers (1856) und an Webers Inductionsapparat. Der erste besteht aus 2 Magnetstäben, die parallel zu einander und zu einer Achse in einer Kupferscheibe stecken und mit dieser rasch gedreht werden; auf der Scheibe sowohl als auch auf 2 auf der Achse sitzenden kleinen Metallrollen schleifen Federn, die zu Klemmen gehen; verbindet man die 2 letzten Federn mit einem Galvanometer, so zeigt sich kein Strom; dagegen ist ein solcher wahrzunehmen, wenn die erste und eine der zwei letzteren mit demselben verbunden werden. Diese Erscheinung ist eine Umkehrung der Rotation von M. um einen Strom (524.). Doch gibt es auch eine Umkehrung der Rotation eines M. um seine Achse (524.), nämlich eine Induction durch Rotation eines M. um seine Achse. Ein Magnetstab steht einerseits mit einer Stahlgabel, anderseits mit einem Räderwerke in Verbindung, das ihn in rasche Rotation versetzt, und trägt in seiner Mitte eine Kupferscheibe, die Quecksilber in einem untergesetzten Gefäße berührt; sind die Gabel und das Quecksilber mit einem Galvanometer verbunden, so zeigt sich bei der Rotation ein Strom. Rotirt eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines Hufeisenm., so entstehen vom Centrum nach der Peripherie gerichtete Str. Eine Umkehrung dieser Erscheinung ist die Rotation von Barlows Rad, das mit seinen Zahnspitzen in Quecksilber zwischen den Polen eines M. taucht und hierdurch radiale Str. enthält, die von dem M. angezogen werden. — 4. Der *Rotationsmagnetismus* oder die Induction in körperlichen Leitern (Arago 1825). Bringt man unter eine schwingende Magnetnadel eine Metallplatte, so nehmen die Schwingungsbögen rascher ab als ohne die Platte; man macht hiervon Anwendung zur *Dämpfung* der Schwingungen von Galvanometernadeln. Bringt man eine Kupferscheibe auf einer Schwungmaschine in rasche Rotation, so wird eine Magnetnadel, die nahe über derselben schwebt (durch eine Glastafel von ihr getrennt), abgelenkt, ja sogar zur Rotation gebracht. Ebenso wirkt ein Elektrom. dämpfend auf die Rotation einer zwischen seinen Polen schwebenden Metallkugel, und ebenso geräth eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines rasch rotirenden starken M. in Rotation. Alle diese Erscheinungen rühren daher, daß die M. Ströme induciren, wenn sie sich in der Nähe von Leitern oder diese sich in ihrer Nähe bewegen. Diese Ströme haben eine den Inductionsgesetzen gemäße Richtung, welche sich am einfachsten aus dem Gesetze von Lenz (1834) ableiten läßt, dem alle Inductionsströme folgen: *der Inductionsstrom hat eine solche Richtung, daß seine und des erregenden Stromes elektrodynamische Wirkung dem Leiter die entgegengesetzte Bewegung von derjenigen ertheilen würden, welche den Strom erregt hat.* Da dieses Gesetz für alle 8 Inductionen gilt, wie man leicht bestätigen kann, so gilt es auch hier; ein bewegter M. und eine bewegte Scheibe erhalten demnach durch die von ihnen inducirten Str. einen Antrieb, der ihrer Richtung entgegengesetzt ist, der daher die Schw. einer Nadel dämpft, und umgekehrt eine ruhende Nadel ablenkt; in dem letzten Falle hat die Nadel das Bestreben, der Scheibe eine ihrer eigenen Richtung entgegengesetzte zu geben; es herrscht demnach zwischen den an die Nadel heran rotirenden Theilen und der Nadel Abstoßung, und zwischen den von der Nadel weg rotirenden Scheibentheilen und der Nadel Anziehung, so daß die Nadel sich in der Richtung der Scheibe drehen muß. — Ist der Magnetstab unbeweglich, so wird ein an demselben schnell vorbeibewegter Magnet warm; so erhöht eine zwischen den Polen eines M. rotirende Metallscheibe ihre Temp. bedeutend und bedarf zu dieser Temperaturerhöhung einer vermehrten äquivalenten Arbeit (Joule 1843, Foucault

1855); man nennt jetzt die in bewegten Metallmassen in der Nähe von Magneten oder Strom-spulen entstehenden und wärmebildenden Inductionsströme Foucault'sche Ströme.

533 **Edlunds Theorie der Elektricität** (Théorie des phénomènes électriques, 1873). Das Medium der el. Erscheinungen ist in Edlunds Theorie der Licht-äther oder Weltäther, von dessen Atomen angenommen wird, daß sie sich im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entf. abstoßen. Ein Körper ist neutral, wenn die Abstoßung seines frei wirksamen Aethers durch die seiner Umgebung aufgehoben wird; er ist dann im normalen Zustande. Ein Körper ist pos. el., wenn er mehr freien Aether enthält als im normalen Zustande: positive Elektricität ist Aetherüberschuß (Exceß); ein Körper ist neg. el., wenn er weniger freien Aether enthält als im normalen Zustande: negative Elektricität ist Aethermangel (Deficit). In guten Leitern hat der freie Aether selbst eine freie Beweglichkeit, in schlechten Leitern ist seine eigene Beweglichkeit gehemmt, er nimmt jedoch an der Beweglichkeit der Körpermol. Antheil. Der el. Strom ist in dem Stromkreise fließender Aether, und die Stromstärke ist die Menge des Aethers, der in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Stromleiters fließt.

1. Die el. Abstoßung und Anziehung, die einfachsten el. Grunderscheinungen, erklären sich nicht einfach, weil auch der Aether der Umgebung mitwirkt. Wegen der freien Beweglichkeit der Aetherat. pflanzt sich jeder Druck nach allen Richtungen fort, wie bei Flüssigkeiten und Luftarten, so daß auch hier das Archimedische Princip gilt, aber nicht in Bezug auf Schwere, sondern auf die Abstoßung des Aethers: Jede Wirkung verliert so viel von ihrem Werthe, als die Wirkung auf den verdrängten Aether ausmacht. Wenn nun die Wirkung zweier el. Körper A und B aufeinander beurtheilt werden soll, so muß zuerst ihre eigene Aetherwirkung aufeinander untersucht werden; dieselbe ist eine Abstoßung. Haben die 2 Körper die normalen Aethermengen a und a_1 und die Ueberschüsse b und b_1, sind also beide pos., so ist ihre Abstoßung $-(a+b)(a_1+b_1)/r^2$. Zweitens muß beachtet werden die Wirkung der Umgebung auf den Körper B; da hierbei die schon betrachtete Wirkung von A auszulassen ist, so ist die Abstoßung von der Seite her, wo sich A befindet, kleiner, als von der entgegengesetzten Seite her; durch diese größere Abstoßung von der entgegengesetzten Seite her wird B dem A genähert, sie wirkt, wie wenn A eine Anziehung hätte; dieselbe ist, dem fehlenden a entsprechend $= +a(a_1+b_1)/r^2$. Nun kommen noch die 2 [illegible]triebwirkungen, die von A auf den durch B verdrängten Aether, welche $= -(a+b)a_1/r^2$ ist, und die der Umgebung auf diesen Aether, welche $= +aa_1/r^2$ ist. Werden die letzten zwei Ausdrücke von der Summe der beiden ersten subtrahirt, so erhält man die Schlußwirkung $-(a+b)(a_1+b_1)/r^2 + a(a_1+b_1)/r^2 + (a+b)a_1/r^2 - aa_1/r^2 = -bb_1/r^2$. Dieselbe ist also eine Abstoßung, die nach dem Gesetze des Productes der beiden Elektricitätsmengen und dem umgekehrten Quadrat der Entf. wirkt. — Wenn nun bewiesen ist, daß 2 pos. el. Körper sich nach dem bekannten Gesetze abstoßen, so findet sich auf ähnliche Weise, daß auch 2 neg. el. Körper sich nach demselben Gesetze abstoßen; in solchen haben die 2 Körper Aetherdeficite $-b$ und $-b_1$; also ist die Summe der 4 Wirkungen $= -(a-b)(a_1-b_1)/r^2 + a(a_1-b_1)/r^2 + (a-b)a_1/r^2 - aa_1/r^2$, was ebenfalls $= -bb_1/r^2$ ist, also ebenfalls Abstoßung bewirkt. — Ist dagegen der eine Körper A pos., also mit dem Exceß $+b$, und der andere neg., also mit dem Deficit $-b_1$ begabt, so ist die Summe der 4 Wirkungen $= -(a+b)(a_1-b_1)/r^2 + a(a_1-b_1)/r^2 + (a+b)a_1/r^2 - aa_1/r^2 = +bb_1/r^2$. Die Schlußwirkung ist also hier eine Anziehung nach dem bekannten Gesetze. Obwohl dieser Erklärung die wünschenswerthe Einfachheit fehlt, so hat sie jedoch den Vorzug, das Gesetz der Wirkung sogleich mit zu entwickeln.

2. Die Influenz. Ist ein pos. Körper, d. h. ein Aetherüberschuß in der Nähe eines normalen Körpers, so ist die Abstoßung von der Seite des pos. Körpers her größer als von der entgegengesetzten Seite her; demnach werden die Aetherat. des normalen Körpers in die abgewandte Hälfte gestoßen, es entsteht hier ein Aetherexceß, pos. El., während in der zugewandten Hälfte ein Aetherdeficit, neg. El. erzeugt wird. — Ist der influenzirende Körper neg., also mit einem Deficit versehen, so ist von seiner Seite her die Abstoßung geringer als von der entgegengesetzten Seite her die Abstoßung durch die Umgebung ist; diese treibt daher die Aetherat. des normalen Körpers in die zugewandte Hälfte, wodurch diese pos. wird, während in der abgewandten Hälfte ein Aethermangel, neg. El. entsteht. — In ähnlicher Weise erklärt sich auch die Ladung der el. Flasche u. a. Ansammlungsapparate, sowie deren Entladung, welche nichts anderes ist, als die Strömung des angesammelten Excesses durch einen Schließungsbogen zu dem stark vergrößerten Deficit.

3. Der Sitz der El. auf der Oberfläche: Der normale Aethergehalt eines

Körpers ist im Gleichgewichte mit dem Aether der Umgebung; ist nun der Körper pos., also mit einem Exceß von Aether geladen, so stoßen sich dessen At. ab, treiben sich also auseinander, bis ihnen der Widerstand eines schlechten Leiters das Weitergehen nicht gestattet, also bis an die Oberfläche. Ist der Körper neg., also mit einem Aetherdeficit versehen, so ist die Abstoßung der Umgebung größer als die des Körpers, treibt also die Aetherat. des Körpers von der Oberfläche nach innen, wodurch das Deficit, d. i. die neg. El. an der Oberfläche am stärksten ist.

4. *Der elektrische Strom* ist nach Edlund fließender Aether. Die *elektromotorische Kraft* hat demnach keine andere Aufgabe, als die in Form von Wärme schon vorhandene Schwingungsbewegung des Aethers in eine fortschreitende Bewegung zu verwandeln; wo ein Strom entsteht, muß Wärme verschwinden, wie dies direct Peltiers Kreuz beweist. Die Geschw. der fortschreitenden Bewegung der Aetherat. ist nicht zu verwechseln mit der Geschw. der El. selbst, mit der Geschw., womit die el. Bewegung fortgepflanzt wird. Die letztere könnte nach Edlunds Theorie höchstens gleich der des Lichtes sein, da ja diese die Geschw. der Wellenbewegung im freien Aether bedeutet, also höchstens = 40000 M. = 300 Mill.m; Edlund hält daher die von Wheatstone aufgefundene Geschw. der El. im Kupferdrahte, 62000 M. für zu groß, und traut den Resultaten von Fizeau und Gounelle eine größere Wahrscheinlichkeit zu, insbesondere da diese Forscher die Unabhängigkeit der Geschw. von der Stromstärke und dem Leitungsquerschnitt wahrnahmen, was mit der Aethertheorie stimmt, indem nach dieser die Geschw. nach der Fl. $\sqrt{e/d}$ nur von der Elasticität und Dichte des Aethers abhängt. Anders verhält sich hierin die Geschw. des Fließens der Aetheratome selbst, welche nach der Aethertheorie der Stromstärke proportional sein muß, da diese als die Aethermenge zu definiren ist, die in der Zeiteinheit durch den Querschnitt des Stromleiters geht. Bei einem und demselben Strome steht hiernach die Geschw. des Fließens im umgekehrten Verhältnisse zum Querschnitte der Leitung, da durch einen n mal kleineren Querschnitt nur dann dieselbe Aethermenge fließt, wenn ihre Geschw. n mal größer ist. In einer späteren Arbeit (1877) bemerkt E., daß viele Umstände für die Annahme sprechen, die größtmögliche Geschw. der Aetherat. sei 440 Mill.m; dies erinnert an den mehrfach besprochenen gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen der Geschw. der fortschreitenden Wellenbewegung und der Geschw. der Mol., wonach letztere das 3/2 fache der ersteren sein soll; ebenso bemerkt E., daß auch jene Geschw. der Aetheratome als sehr groß angenommen werden müsse, wenn nicht die Stromstärke sehr klein oder der Leiterquerschnitt sehr groß sei. Diese Geschw. ist in E.'s Aethertheorie von großer Wichtigkeit, da sie in seinem elektrodynamischen Grundgesetze auftritt, das er aus dem axiomatischen Princip: jede Wirkung erfordert eine gewisse Zeit, ableitet; er gelangt hierdurch zu dem Resultat, daß die Abstoßung bewegter Aetheratome nicht, wie die der ruhenden At. durch die Fl. $\varepsilon\varepsilon_1/r^2$ ausgedrückt sei, sondern daß noch ein Klammerausdruck $(1 + \cdots - \cdots)$ beigefügt werden müsse, wodurch sein elektrodynamisches Grundgesetz die von Ampère experimentell gefundene und von C. Neumann (1873) mathematisch abgeleitete Gestalt annehme. In der Arbeit (1877) scheint E. diesem Gesetze nur für gewisse Grenzen Gültigkeit beizulegen. Auch Clausius hat (1875) ein elektrodyn. Grundgesetz aufgestellt, gegen welches Lorberg sich (1877) zu Gunsten des Weber'schen (81.) entscheidet; über diesen Gegenstand sind also die Acten noch nicht geschlossen.

5. *Der galvanische Widerstand*, d. i. der Widerstand, welchen ein Leiter dem Fließen des Aethers entgegenstellt; er rührt her von der Reibung der freien Aetherat. an den Aetherhüllen der Körpermol., zwischen denen sich der freie Aether durchdrängen muß, wirkt daher als ein Gegendruck auf den fließenden Aether, der über den ganzen Querschnitt gleichmäßig vertheilt ist, und wird demnach durch den Gegendruck auf die Querschnittseinheit gemessen. Daß die physikalische und chemische Beschaffenheit des Leiters, die in dem spec. Leitungswiderstande ihren Ausdruck findet, den Haupteinfluß auf den galv. Widerstand ausübt, ist leicht zu begreifen; die Proportionalität zur Länge scheint E. als selbstverständlich anzusehen, da er nicht von derselben spricht; die inverse Prop. zum Querschnitt wird folgendermaßen abgeleitet: bei einem und demselben Strome ist die Geschw. des Aethers umgekehrt prop. zum Querschnitt; da nun der Widerstand offenbar mit der Geschw. der Aetherat. wächst, so ist er wie diese umgekehrt prop. zum Querschnitt. Da nun die Geschw. des Aethers auch die Stromstärke bedingt, so folgert E. hieraus den bisher unbekannten Satz: *der Widerstand ist der Stromstärke proportional*. E. leitet aus diesem Gedanken den ersten Theil des Ohm'schen Gesetzes ab, sowie das zweite Kirchhoff'sche Gesetz der Stromverzweigung, (das erste sei ein Axiom), und entwickelt für die Wärmewirkung des el. Stromes mit der Erfahrung stimmende Formeln, was allerdings für jenes Gesetz spricht. Daß dasselbe bisher der Beachtung entschlüpft sei, meint E., rühre von der Art der Erforschung der Widerstände her, bei der man immer nur den Widerstand bei derselben Stromstärke 1 bestimmt habe. In einer späteren Arbeit (1875) zeigte E., daß eine aus dem neuen Gesetze gezogene Schlußfolgerung durch das Exp. bestätigt werde: wenn der Widerstand von der Stromstärke, also von der Aethergeschw. abhängt, so muß er kleiner werden, wenn sich der

Leiter in der Stromrichtung rasch bewegt, dagegen größer, wenn der Leiter sich in entgegengesetzter Richtung zum Strome bewegt; das Eintreffen dieser Folgerung bei mehrfach veränderten Versuchen hält E. für eine wesentliche Stütze seiner Theorie und eine Bestätigung seines Gesetzes.

6. Die Elektrolyse beruht auf der verschiedenen Anziehung zwischen den At. der verschiedenen Elemente und den At. des freien Aethers. Nach optischen Thatsachen ist die Annahme geboten, daß die Körperatome den Aether um sich herum zu einer Aetherhülle verdichten; die Aetherat. außerhalb dieser Hüllen werden von dem verdichteten Hüllenäther ebenso stark abgestoßen, wie von den Körperat. angezogen, weßhalb sie eben frei sind; und diese freien Aetherat. sind es, die in Edlunds Theorie die el. Erscheinungen bilden. Die gleichen optischen Thatsachen gebieten auch die Annahme, daß die verschiedenen Stoffe den Aether in verschiedener Stärke verdichten, daß also die Anziehung zwischen den At. der verschiedenen Elemente und dem Aether verschieden groß ist. E. nimmt nun an, daß bei der Vereinigung verschiedener At. zu einem Mol. dieser Unterschied noch stärker werde, worauf die Thatsache hinweise, daß bei dem Contact heterogener Körper der eine pos., der andere neg. el. auftrete; im Wasser z. B. habe das H-Mol. einen Ueberschuß, das O-At. einen Mangel von Aether; deßhalb werde von einem vorübergehenden freien Aetheratom eines el. Stromes das erstere abgestoßen, das letztere angezogen, während der Aether des ganzen Mol. nach der abgewandten Seite strömt; hierdurch werde die zusammenhaltende Kraft immer kleiner und die auseinandertreibende immer größer, so daß endlich eine Spaltung des Mol. eintrete. Von allen Edlund'schen Erklärungen gewährt diese am wenigsten Befriedigung; auch hatte E. in seinen ersten Publicationen eine andere, auf der Induction beruhende Erklärung gegeben.

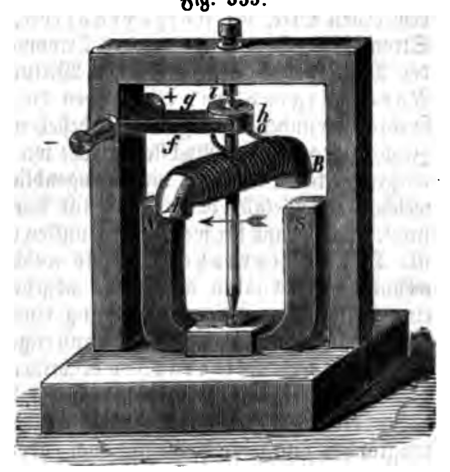
7. Die Induction. Wenn in der Nähe eines Leiters Aether verdichtet wird, so vergrößert sich dessen Abstoßung auf die freien Aethertheilchen des Leiters, dieselben werden aus ihrer ursprünglichen Lage gestoßen, sie bilden einen momentanen stoßweisen el. Strom; wenn die Verdichtung beseitigt wird, so kehren die Theilchen durch die Abstoßung ihrer Umgebung in die ursprüngliche Lage zurück, sie bilden einen zweiten momentanen Strom von der entgegengesetzten Richtung. Nun wird aber auch nach dem elektrodynamischen Grundgesetze die Abstoßung des Aethers verändert, wenn derselbe in fortschreitende Bewegung versetzt wird, wenn er einen el. Strom bildet; demnach müssen beim Schließen eines Stromes die Aetherat. eines benachbarten Leiters in eine neue Gleichgewichtslage übergehen, also einen momentanen Inductionsstrom erzeugen, und beim Oeffnen müssen sie in die frühere Lage zurückkehren, d. i. einen entgegengesetzten Inductionsstrom veranlassen. — Die unipolare Induction ist nach Edlund (1878) überhaupt keine Inductionserscheinung, sondern eine elektrodynamische Anziehung oder Abstoßung: Wenn ein metallischer Mantel um einen M. rotirt, so beschreibt sein Aether Kreisströme, die von den Elementarströmen des M. angezogen oder abgestoßen werden, je nachdem die Richtungen der beiden Stromarten gleich oder entgegengesetzt sind; hierdurch entsteht um die Mitte des Mantels, über der Indifferenzgegend, ein Ueberschuß oder Mangel an Aether, und an seinem Ende, in der Polgegend, das entgegengesetzte; werden daher Ende und Mitte durch einen Draht verbunden, so enthält derselbe einen el. Strom. Diese Erscheinung hat E. zu einer Erklärung des Nordlichtes benutzt, die allgemeinen Anklang gefunden hat (s. Meteorologie).

534 **Anwendungen des Elektromagnetismus und der Induction.** 1. Die elektromagnetischen Kraftmaschinen oder Motoren (Jacobi 1835) sind solche Masch., welche elektrische Ströme durch Magnetismus in Arbeit verwandeln. Die magnetelektrischen Maschinen verwandeln im Gegentheil Arbeit durch Magnetismus in elektrische Ströme. Wie der Name, so ist auch der Zweck der beiden Arten von Maschinen der umgekehrte. Hierdurch wird der Gedanke nahe gelegt, daß eine und dieselbe Maschine beiden Zwecken dienen könne, und wirklich werden die magnetelektrischen Maschinen, wenn in den Draht ihrer Spulen ein elektrischer Strom eingeführt wird, zu elektromagnetischen Motoren, d. h. sie werden in Bewegung versetzt und können Arbeit leisten. Wird z. B. ein Batteriestrom in eine Gramme'sche Masch. geleitet, so wird an jedem Pol die eine Hälfte der Spulen angezogen, die andere abgestoßen, und zwar an beiden Polen in entgegengesetzter Richtung, wodurch der Ring in Rotation gerathen muß. Da der treibende Strom von einer anderen Gramme'schen Maschine statt von einer Batterie herrühren kann, so können zwei magnetelektrische oder dynamoel. Maschinen einander treiben, die Arbeit an der einen erzeugt einen Strom, und dieser Strom erzeugt an der anderen Arbeit; durch zwei magnetelektrische Maschinen geschieht

also eine Uebertragung von Arbeit. Durch Entstehung von Wärme in den Leitern, von inducirten Gegenströmen und durch die Widerstände werden etwa 50% der ursprünglichen Arbeit aufgezehrt; bei langen Leitungen mag dieser Verlust noch größer werden. Jedoch wäre es auf diese Weise möglich, durch Verbindung von zwei dynamoelektrischen Masch. durch Kabel die Arbeit der Gebirgsbäche, Wasserfälle, der Meeresfluth nutzbar zu machen.

Schon lange vor der Einführung der magn.-el. Masch. gab es eine große Anzahl von el.-magn. Motoren; der einfachste ist von Ritchie (1836) (Fig. 335). Derselbe besteht aus einem U-förmigen Stahlm. NS, über dessen Polen ein ganz kurzer Elektrom. AB um eine vert. Achse drehbar schwebt. Auf der Achse sitzt der Commutator, bestehend aus einem Holzringe ih mit 2 nicht ganz halbkreisförmigen Messingstreifen als Mantel, auf welchen 2 von den Polklemmen-herkommende Federn f u. g schleifen, und an welche die Enden o des Drahtes des Elektrom. befestigt sind. In dem Moment, wo die Pole der M. sich gegenüberstehen, schleifen die Federn auf den Zwischenräumen der Halbringe und gehen dann auf einen anderen Halbring über, wodurch der Polwechsel und demnach Abstoßung an Stelle der bisher stattgefundenen Anziehung eintritt und so die Achse weiter gedreht wird. — Jacobi hatte 4 feste und 4 drehbare M., die eine horizontale Achse und mit ihr ein Schaufelrad eines Bootes drehten, mit welchem er (1839) Fahrten auf der Newa machte. — Wagner, dem der deutsche Bundestag (1842) einen hohen Preis ausgesetzt hatte, wollte die explosive Kraft des Knallgases benutzen; doch wird ihm auch die Constr. mit 2 Elektrom. zugeschrieben, welche durch eine Excentriksteuerung abwechselnd den Strom erhielten und dadurch abwechselnd 2 Anker anzogen; diese befanden sich an einem Hebel, der seinen Stützpunkt zwischen den 2 M. hatte und sich daher wie ein Balancier abwechselnd hin- und herneigte, und so mittels seiner Verlängerung eine Kurbel umbrehte. Diese Constr. haben alle den Nachtheil, daß sie ein plötzliches Aufhören des Elektroms. verlangen, was bekanntlich nicht möglich ist. Stöhrer (1846) vermied dies dadurch, daß er den Elektrom. durch eine el. Spirale anziehen und abstoßen ließ, und durch den Commutator nicht den Ms. wechselte, sondern die Richtung des Stromes in dieser Spirale, wodurch ebenfalls der vorher angezogene Elektrom. nachher abgestoßen wurde und so sich und seine Achse in Rotation versetzte. — Page (1850) benutzte die Anziehung, welche eine Drahtspirale auf einen weichen Eisenkern ausübt, zu einer ähnlichen Constr.; zwischen 2 aufrechten Drahtrollen ist ein Balancier um den Mittelpunkt drehbar, und trägt an seinen Enden zwei oben in die Drahtrollen hineinragende Eisenkerne; durch einen auf der Welle sitzenden Commutator wird der Strom während jeder Umdrehung abwechselnd durch die beiden Rollen geleitet, wodurch die Eisenkerne abwechselnd angezogen werden und so den Balancier in eine wiegende Bewegung versetzen, die durch eine Verlängerung desselben und eine Schubstange eine Schwungradwelle dreht. Legt man die zwei Spulen in eine Linie und den Eisenkern in ihre Mitte, so wird derselbe abwechselnd hin- und hergezogen, und kann dann ebenfalls mittels einer Pläuelstange eine Kurbel drehen (Fessel 1851). — Alle diese von Batterien getriebenen Motoren erhielten ihre Kraft durch Verbrennung von Zink mit dem O der Schwefelsäure, waren also viel theurer als die Dampfmasch., die durch Verbrennung von Kohle mit dem O der Luft ihre Wärmekraft erhalten; jene konnten schon deßhalb keine prakt. Verwendung erhalten; außerdem leiden sie wie die magn.-el. Masch. durch Entstehung von Wärme und Gegenströmen. Werden die letzteren jedoch von brachliegenden Naturkräften getrieben, so wird der el. Strom billig, und selbst jene großen Verluste verhindern nicht einen ungeahnten Gewinn durch die el.-magn. Motoren.

Fig. 335.



Die elektrische Telegraphie. Da der el. Strom sich durch metallische Leiter mit großer Geschwindigkeit und mit geringem Verluste an Stromstärke fortpflanzt, so kann man an sehr entfernten Orten Stromwirkungen hervorbringen und dieselben 535

als telegraphische Zeichen benutzen, vorausgesetzt, daß von einem Orte zu dem entfernten Orte eine isolirte und geschlossene Stromleitung vorhanden ist. Zu dieser Stromleitung bedurfte man ursprünglich eines von dem pos. Pole des einen Ortes ausgehenden Drahtes, der an einen zeichengebenden App. des anderen Ortes und dann an den neg. Pol des ersten Ortes zurückging; man bedurfte also zweier Drähte, bis Steinheil (1838) entdeckte, daß an Stelle des zurückleitenden Drahtes die Erde benutzt werden kann, indem an dem ersten Orte der neg. Poldraht, an dem zweiten der pos. in der Erde geleitet wird. Außer dem am zweiten Orte, der **Empfangstation**, befindlichen Zeichen gebenden Apparate, dem **Receptor**, ist auf dem ersten Orte, der **Aufgabestation**, ein Apparat nöthig, mittels dessen durch Stromschluß, Stromöffnung oder Stromunterbrechung die Zeichen gegeben werden, der **Manipulator**. Nach der Wirkungsart des Receptors unterscheidet man **Nadeltelegraphen**, bei welchen die Zeichen in Zuckungen einer vom Stromdrahte umwundenen Magnetnadel bestehen; **Zeigertelegraphen**, an welchen ein Zeiger sich auf einem Buchstabenkreise wie auf einem Zifferblatte dreht und an den telegraphirten Buchstaben einen Augenblick still hält; **Schreibtelegraphen**, in welchen ein Metall- oder Schreibstift Punkt- und Linieneindrücke auf einen Papierstreifen macht, und für welche aus Punkten und Strichen ein eigenes Alphabet gebildet ist; **Drucktelegraphen**, mittels welcher die übersandte Nachricht direct in gewöhnlichen Buchstaben auf Papier abgedruckt wird; **Pantelegraphen**, welche eine vollständig getreue Nachbildung einer jeden beliebigen dem Manipulator dargebotenen Zeichnung oder Schrift anfertigen, und welche als eine specielle Gattung der **chemischen Telegraphen** erscheinen, in denen der Receptor durch eine elektrochemische Zersetzung bleibende Zeichen bildet. Die Nadel- und Zeigertelegraphen haben den Nachtheil, nur vorübergehende Zeichen zu geben, die Druck- und Pantelegraphen sind zwar höchst sinnreich, aber äußerst complicirt, der Schreibtelegraph zeichnet sich durch Einfachheit und durch leichte Verständlichkeit der Zeichen aus.

Die Steinheil'sche Entdeckung, die Erde als Rückleitung zu verwenden, wird in der Weise ausgeführt, daß man auf der Aufgabestation den neg. Poldraht tief in die Erde leitet und dort mit einer großen Metallplatte endigen läßt, während der pos. Poldraht zu der Empfangstation in den Receptor geht und von dort ebenfalls in die Erde geleitet wird und mit einer Platte endigt. Steinheil stellte sich anfangs vor, der el. Strom kehre wirklich von der Endplatte der Empfangstation zu derjenigen der ersten Station zurück, die zwischen beiden Platten liegende Erdsäule sei also ein Leiter des Stromes wie der Draht, und erhalte ihre Leitungsfähigkeit durch ihren größeren Querschnitt. Diese theoretisch wohl zulässige Vorstellung hat aber unannehmbare Consequenzen und widerspricht Versuchen Wheatstones; man hat sie daher durch die Vorstellung ersetzt, die Erde wirke nur als unendlich großes Reservoir, in welchem sich jede El. von menschlichen Apparaten spurlos verliere. Diese Vorstellung hat aber den Mangel, daß in ihr der el. Strom in dem Telegraphendrahte nur aus einer Art von El. besteht, während doch früher der el. Strom als eine Vereinigung der beiden einander entgegenströmenden El. dargestellt wurde. Bedenkt man aber, daß die zweite, gegenströmende El. nur die Aufgabe hat, die erste zu neutralisiren und so erneutes Fortströmen derselben möglich zu machen, so muß man zugeben, daß die Aufgabe auch gelöst ist, wenn die erste El. in das unendliche Reservoir einströmt und dadurch verschwindet.

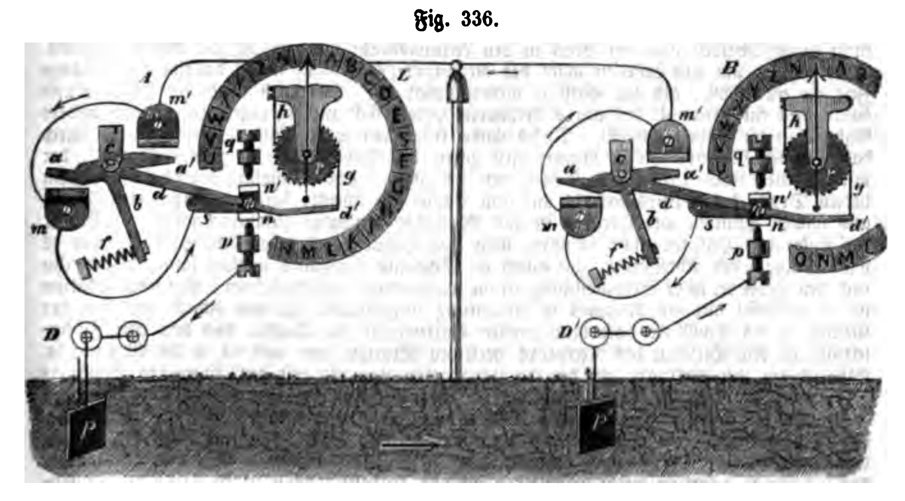
Sömmering in München (1808) construirte den ersten el. Telegraphen, indem er die el. Wasserzersetzung in 35 Gläschen mit 35 Drähten benutzte. Nach Oersteds Entdeckung (1820) schlug sogleich Ampère an Stelle dieser Gläschen Magnetnadeln vor. Schilling von Canstatt (1832) wandte zuerst nur 2 Drähte und eine Nadel an, deren Zuckungen die Zeichen gaben, welche durch einen Stromwechsler auf der ersten Station erregt wurden. Gauß und Weber (1833) führten den ersten Nadeltelegraphen im Großen zwischen dem physikalischen Cabinet und der Sternwarte in Göttingen aus, benutzten aber als Manipulator einen Magnetinductor, dessen Rolle sie von dem M. weghoben und wieder aufsetzten. Steinheil (1837) construirte den ersten Drucktelegraphen zwischen München und Bogenhausen; an zwei sich drehenden M. waren kleine mit flüssigem Pigment gefüllte Gefäßchen befestigt, welche nach der Drehung einen Papierstreifen berührten und so Zeichen auf denselben machten; hierbei wurde auch zuerst die Erde als Rückleiter benutzt. Hiernach ist die Telegraphie

eine durch und durch deutsche Erfindung; doch waren die Apparate unpractisch und wurden nicht für große Strecken und nicht für das gewöhnliche Leben verwendet. Dies geschah zuerst mit dem Nadeltelegraphen von Wheatstone und Cooke (1837) an der Great-Western-Eisenbahn in England, wobei indeß noch 5 Nadeln und 5 Drähte zur Verwendung kamen, die jedoch bald dem einfachen und Doppelnadel-Telegraph weichen mußten. Wheatstone ist der Erfinder des Zeigertelegraphen (1840), des elektromagn. Weckers und des **Relais**, das dazu dient, einen Receptor durch eine Localbatterie der Empfangstation in Bewegung zu setzen, da hierzu der schwache von der Aufgabestation herkommende Strom meist nicht ausreicht. Schon in dem Zeigertelegraphen wie in dem Relais wurde der Elektroms. benutzt, indem durch den Strom der Aufgabestation ein Hufeisen der Empfangstation magn. gemacht wurde; die wichtigste Anwendnug gab Morse dieser Idee, der sie schon 1832 gefaßt und 1537 in einem Modell ausgeführt hatte, aber erst 1844 auf einer größeren Strecke zur Anwendung brachte, indem er durch die Bewegungen eines von einem Hufeisen angezogenen Ankers einen Schreibstift in Bewegung setzte. Die Zeigertelegraphen wurden in Frankreich von Breguet (1845), in Deutschland von Siemens und Halske (1848), sowie von Kramer auf den höchsten Grad der Vollkommenheit gebracht. Der Drucktelegraph, für welchen Wheastone (1841) und Morse (1847) die ersten Constr. erfunden hatten, erreicht in dem Apparat von Hughes in New-York (1861) die größte Vollendung. Der erste elektrochemische Telegraph war vou Bain (1843), dann folgte Bakewell (1847) mit seinem Copirtelegraphen und Gintl (1853) mit einer dem Morse'schen Schreibetelegraphen ähnlichen Einrichtung; das Ideal aber erreichte Caselli nach 10jähriger Arbeit (1856—65) in seinem Pantelegraphen. Das wichtigste Ereigniß in der Telegraphie bildet dann der transatlantische Telegraph, in welchem die Gauß'sche Spiegelablesung zu erweiterter Anwendung kam.

1. **Der Nadeltelegraph.** Auf der ersten Station steht als Manipulator ein Stromwechsler, auf der zweiten als Receptor eine vertical aufgestellte astatische Doppelnadel, deren innere Nadel in einem Multiplicator schwebt, während die äußere Nadel vor demselben und dem ganzen Gehäuse als Zeiger sichtbar ist; der Multiplicator ist in die Drahtleitung eingeschaltet und trägt seitlich einen Stift, so daß die Nadel sich nicht ganz senkrecht zu den Windungen stellen, sondern nur kurze Zuckungen machen kann. Wird auf der Aufgabestation der Strom geschlossen, so zuckt die Nadel nach der einen Seite; wird der Strom umgekehrt, nach der andern Seite; aus diesen Zuckungen nach rechts und links ist das Alphabet zusammengesetzt. So einfach die Einrichtung auch ist, so gibt sie doch zu vielen Irrthümern Veranlassung, weil die Zeichen vorübergehend sind und eine so gespannte Aufmerksamkeit verlangen, daß die meisten Menschen dieselbe bald nicht mehr leisten können und die Zeichen falsch auffassen.

2. **Der Zeigertelegraph** von Siemens und Halske unterscheidet sich von dem Breguets, Wheatstones und Anderer dadurch, daß in diesen die Umdrehung durch ein mittels

Fig. 336.

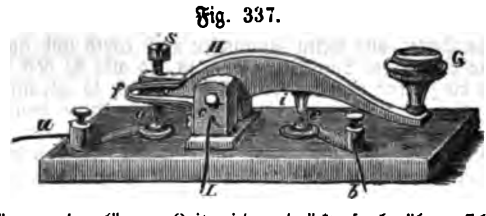


des Elektrom. ausgelöstes oder regulirtes Uhrwerk geschieht, in jenem aber durch den Elektrom. selbst. Ein und derselbe App. wird, wie Fig. 336 zeigt, als Manipulator und Receptor benutzt. Auf der Abgangstation B geht der pos. Strom der Batterie D' durch die Schraube p

und den Schlitten n n' zu dem Hufeisen, dessen beide Pole in m und m' sichtbar sind, und von diesem durch die Leitung L auf die Empfangstation A ebenfalls um das Hufeisen zu dem neg. Pole der Localbatterie D, während die anderen Pole der Batterien mit den Erdplatten P und P' verbunden sind; diese Einrichtung hat den Erfolg, daß jeder Apparat durch beide Batterien getrieben wird, daß also die Schwächung des Stromes der entfernten Batterie, der sogenannten Linienbatterie, durch die Leitung nicht merklich wird. Die Hufeisen werden durch den Stromschluß zu M., ziehen die Anker a und a' an und drehen dadurch den Hebel d d' um den Punkt s nach oben, wodurch der Haken g in einen folgenden Zahn des Zeigerrades r gehoben wird. Zu gleicher Zeit wird durch die Hebeldrehung der Strom zwischen p und n unterbrochen, die Hufeisen verlieren ihren Ms., die Anker werden nicht mehr angezogen und durch die Abreißfeder f in ihre frühere Lage zurückgeführt, wodurch der Haken g das Rad r in die Stellung dreht, daß der neugegriffene Zahn in die Lage des vorher gegriffenen gelangt und so der Zeiger auf dem Buchstabenkreise um einen Buchstaben weiter gedreht wird. Durch die Zurückdrehung des Hebels d d' ist nun der Strom zwischen p und n wieder geschlossen, und so wiederholt sich der ganze Vorgang in schneller Folge, so daß der Zeiger sich rasch auf dem Buchstabenkreise dreht, bis zu dem Buchstaben, dessen Taste niedergedrückt ist, und welche hierdurch den Zeiger festhält. Da auf beiden Stationen die Apparate in gleicher Weise wirken und vor dem Beginne des Telegraphirens auf das leere Feld zwischen A und Z gestellt sind, so weilt der Zeiger der Empfangstation immer auf dem Buchstaben, dessen Taste auf der Abgangstation niedergedrückt wird. — Diese Apparate ermöglichen eine große Geschw. des Telegraphirens; indessen beträgt doch die mittlere Geschw. der Zeigertelegraphen nur etwa 40 Buchstaben per Min.; außerdem werden alle Zeichen falsch, wenn durch irgend einen Unfall der correspondirende Gang der Apparate auf beiden Stationen gestört wird; deßhalb sind die Zeigertelegraphen von den Schreibtelegraphen verdrängt worden.

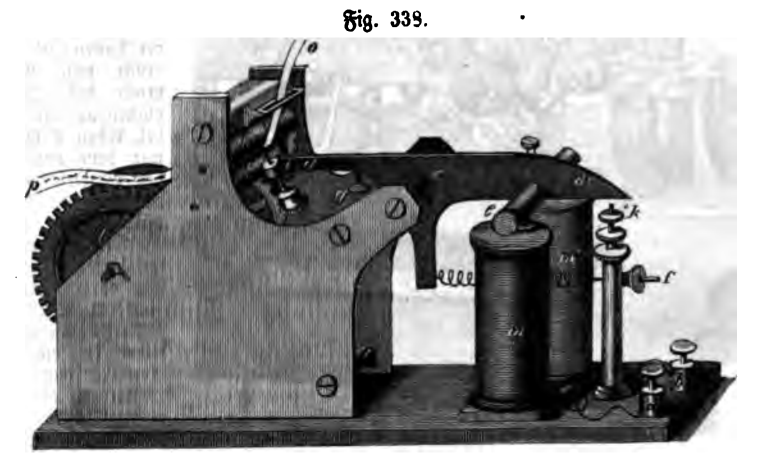
3. **Der Schreibtelegraph** von Morse enthält als Manipulator einen Apparat zum Schließen des Stromes für beliebig kurze oder längere Zeit, den sogenannten Schlüssel (Fig. 337), und als Receptor den Schreibapparat (Fig. 338). Der Schlüssel dient dazu, von der Abgangstation aus den Strom auf der Empfangstation nach Belieben für kürzere oder längere Zeit zu schließen. Zu diesem Zwecke geht der eine Poldraht der Batterie zu der Klemme b, und der Leitungsdraht L an das Lager der Achse c, um welche sich der Hebel G H drehen kann. Wird mittels des Griffes G die rechte Seite dieses Hebels für kürzere oder längere Zeit niedergedrückt, so berühren sich die Nasen i und e, und der Strom fließt durch dieselben und den Hebel in den Leitungsdraht, und so auf die andere Station. Dort geht er um das Hufeisen m m' des Receptors (Fig. 338), macht dasselbe für so lange Zeit zu einem M., als der Griff g niedergedrückt ist. Hierdurch wird der Anker e und damit das eine Ende d' des um c drehbaren Hebels d d' niedergezogen und so das andere Ende d in die Höhe geschnellt. Dieses Ende trägt den Schreibstift i, dessen Spitze durch das Erheben für kürzere oder längere Zeit gegen den Papierstreifen o p gedrückt wird, der mittels eines Uhrwerkes q sich zwischen den 2 Walzen l und h langsam fortschiebt; bei dem kurzen Drucke des Stiftes entsteht auf dem Papier ein Punkt, bei dem langen ein Strich; aus solchen Punkten und Strichen ist das Morse'sche Alphabet zusammengesetzt. — Damit der Anker das Hufeisen nicht berühre, stößt das Hebelende d' gegen den Stift k, und es wird demnach der Abreißfeder, die durch die Schraube f regulirt werden kann, leicht, ihn und den Hebel bei jeder Stromöffnung in die frühere Lage zurückzuführen. Auf jeder Station ist ein Schlüssel und ein Receptor in die Leitung eingeschaltet; zu dem Zwecke geht von der Klemme a des Schlüssels nach dem zweiten Batteriepole ein Draht, von dem eine Zweigleitung zu dem Hufeisen des Receptors derselben Station und von da in die Platte geht, während der Leitungsdraht auf der Empfangstation ebenfalls mit dem Lager des Schlüssels verbunden ist. Auf der Empfangstation hat der Schlüsselhebel die unveränderte Lage, in welche ihn die Feder f zurückführt, und in welcher die Schraube s die Nase o berührt, auf der Abgangstation beim Stromschlusse die niedergedrückte Lage. Es fließt dann der Strom von dem pos. Pole der Abgangsbatterie durch die Nasen i und e in die Leitung und dann auf der Empfangstation durch die Nase o an das Hufeisen, dann in der Erde an die Abgangstation zurück und dort um das Hufeisen herum an den neg. Pol. Da bei diesem Stromlaufe beide Hufeisen immer durch eine Batterie versorgt werden, so ist der Strom häufig zu schwach für den Receptor der Empfangstation; deßhalb wird mittels des **Uebertragers** oder **Relais** dieser Receptor mit der Batterie der Station verbunden; der Re-

Fig. 337.



ceptor wird nicht durch die Linienbatterie, sondern durch die Localbatterie getrieben, und jene hat nur die Aufgabe, mittels des Relais diese Verbindung herzustellen. Dieses besteht aus einem von dem Leitungsdrahte umwundenen Hufeisen, dessen Anker einen Theil eines sehr leicht drehbaren Hebels bildet, der an einem Ende mit dem einen Poldrahte der Localbatterie in Verbindung steht, während der andere zu einem ganz in der Nähe befindlichen Schraubenstifte geht. Der durch die mangelhafte Isolirung der Leitung geschwächte Linienstrom hat noch Kraft genug, den Hebel anzuziehen und dessen Ende mit dem Stifte in Berührung zu bringen; dadurch wird der Localstrom, in dessen Leitung der Receptor eingeschaltet ist, geschlossen. In dem polarisirten Schreibtelegraph von Siemens und Halske ist das Relais entbehrlich gemacht. Das Hufeisen steht hierin auf dem Nordpole eines plattenförmigen rechtwinkelig umgebogenen Stahlmagnetes, während der Schreibhebel durch den Südpol desselben und durch die beiden Hufeisenpole geht. Da diese schon durch

Fig. 338.

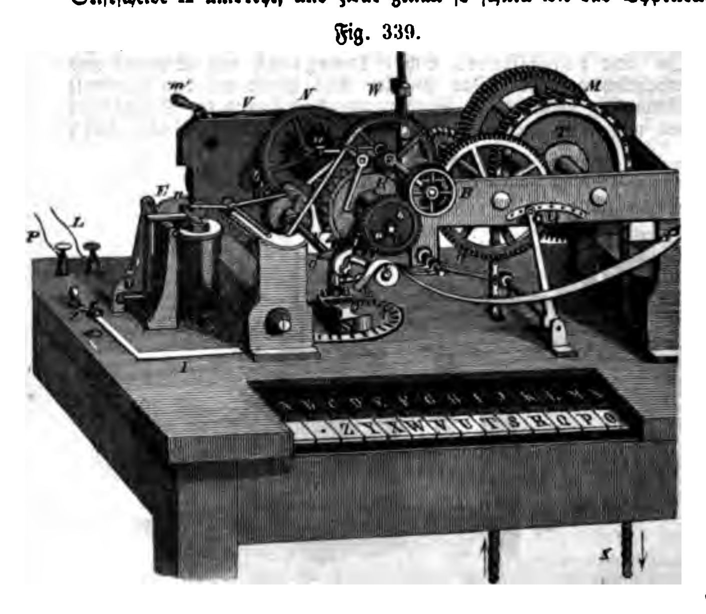


Influenz permanente Nordpole sind und der Schreibhebel in ihrer Nähe einen permanenten Südpol hat, und da weiter die beiden Nordpole durch den Stromschluß abwechselnd aufgehoben und gestärkt werden, so erhält der Schreibhebel zwischen denselben ohne Abreißfeder eine hin- und hergehende Bewegung, welche wegen der Zusammenwirkung des permanenten und des el. Nordpolmagnetismus auf den Südpol des Hebels stark genug für den Druck des Schreibstiftes ist. Bei dem Farbschreiber von Siemens und Halske wird durch den Hebel eine in gefärbter Flüssigkeit rundlaufende Kreisscheibe für kürzere oder längere Zeit gehoben und gegen den Papierstreifen gedrückt, wodurch statt der Punkt- und Stricheindrücke farbige Punkte und Striche entstehen. — Die Schreibtelegraphen sind sehr einfach construirt, geben 80—100 Zeichen in der Minute, bedürfen aber einer längeren Einübung für das rasche Zeichengeben und für das Lesen, worin übrigens die Telegraphisten es zu solcher Gewandtheit bringen, daß sie bei dem älteren Stiftschreiber schon aus dem Klappern des Stiftes die Depesche erkennen. Diese Leseübung ist bei den Drucktelegraphen nicht nöthig.

4. Der Drucktelegraph von Hughes besteht (Fig. 339) aus einem Tastenwerke mit Buchstaben als Manipulator, der mit dem sehr complicirten Receptor in ein Ganzes verbunden ist, das sowohl auf der Abgang-, wie auf der Empfangstation in ganz gleicher Weise aufgestellt ist und die Depesche auf beiden Stationen abdruckt. Der Receptor wird durch ein an der Kette x hängendes Gewicht bewegt, das zunächst die Achse des Kettenrades T und das Rad M dreht, welches mittels kleiner Getriebe und großer Räder eine 2te, 3te, 4te, 5te Achse in immer schnellere Umdrehung versetzt, so daß die 4te Achse, die Typenradachse mehr als 100, die 5te, die Daumenachse $b_1 b'$ mehr als 700 Touren in 1 Min. macht. Diese letzte Achse, welche 4 Daumen trägt, wird nicht von einer einzigen Welle gebildet, sondern besteht aus 2 Wellen, der hinteren b_1, die mittels des Rades N in ihre schnelle Drehung versetzt wird, wenn das Uhrwerk aufgezogen ist, und der vorderen b′, welche erst bei geschlossenem Strome durch das Schaltwerk ng mit der hinteren verkuppelt wird und dadurch an der schnellen Drehung derselben Theil nimmt; bei dieser Drehung greift der vorderste Daumen unter eine Gabel, und hebt mit derselben für einen Augenblick das Druckrad c mit dem Papierstreifen, und drückt diesen gegen das Typenrad a, das auf seinen 26 Zähnen die Buchstabentypen und ein blankes Feld enthält. Die Achse dieses Rades, die 4te oder Typenradachse besteht ebenfalls aus 2 Theilen; der hintere, der das Rad

N trägt, dreht sich durch das Uhrwerk; der vordere, auf dem das Typenrad a sitzt, wird erst durch ein Schaltwerk, das von dem Daumen o ausgelöst wird, mit dem hinteren verkuppelt, und demnach erst bei dem Beginne des Telegraphirens gedreht. Der hintere Theil der Typenradachse setzt mittels zweier ganz gleichen conischen Räder eine verticale Achse, die Schlittenachse in Umdrehung, deren unterster Theil den Schlitten S auf der festsitzenden Stiftscheibe A umdreht, und zwar genau so schnell wie das Typenrad a. Die Stiftscheibe hat 26 Oeffnungen an ihrem Umfange; durch jede Oeffnung kann von unten her ein Stift heraufdringen, der den oberen Theil des Schlittens S hebt. Dies geschieht mittels der Tasten; jede Taste drückt beim Niederdrucke des Telegraphisten auf einen Hebel, dessen Stützpunkt mit dem pos. Pole der Batterie verbunden ist, und hebt so mittels des Stiftes den Schlitten, wodurch der Strom nicht mehr wie vorher auf den unteren Theil der Schlittenachse und dadurch in die Erde, sondern durch den Schlitten auf den oberen Theil dieser Achse geht, der von dem unteren durch eine Elfenbeinplatte isolirt ist. Von der Achse geht der Strom durch die Elektrom. E; diese sitzen auf einem Stahlm., sind also permanente M., die den Anker n anziehen und dadurch den Hebel ng unberührt lassen. Kreist aber der Strom, so verlieren sie ihren M., der Anker n ist lose und wird durch die Abreißer r in die Höhe geschnellt, wodurch das andere Ende g des Hebels sich nach unten bewegt. Durch diese Bewegung wird durch ein Schaltwerk der vordere Theil der Daumenachse mit dem hinteren verkuppelt, macht eine schnelle Umdrehung und wirft mittels der Gabel das Druckrad c gegen das Typenrad, löst sich aber durch das Schaltwerk sofort wieder von dieser Verbindung ab, bis ein neuer Stromschluß durch das Niederdrücken einer Taste abermals die Kuppelung bewerkstelligt. Da nun der Strom von dem Elektrom. der Abgangstation zur Leitung, dann in die Schlittenachse der Empfangstation und um deren Elektrom. geht, so wiederholt sich hier gleichzeitig derselbe Vorgang. Bei jedem Niederdrücken einer Taste wird also auf beiden Stationen das Druckrad mit dem Papier gegen die unterste Stelle des Typenrades a gedrückt, auf welchem durch die Schwärzrolle B die Typen immer mit Druckschwärze bedeckt werden. Es kommt nun darauf an, daß in diesem Moment derjenige Buchstabe sich an der untersten Stelle des Typenrades befindet, dessen Taste niedergedrückt wird. Dies ist dadurch hervorgebracht, daß die Schlittenachse und die Typenachse dieselbe Drehung haben; dann ist die Stellung des Schlittens so regulirt, daß er über der Stiftöffnung der Taste „Blank" steht, wenn am Typenrade das Feld „Blank" nach unten gekehrt ist; da nun die Zahl der Oeffnungen der Stiftscheibe mit der der Zähne des Typenrades stimmt, so ist der Schlitten immer über derjenigen Oeffnung, deren Stifttaste denselben Buchstaben hat, der am Typenrade am untersten ist. Die Einstellung des Typenrades auf Blank, das Verkuppeln desselben mit der Typenachse, die Correction seiner Stellung durch das Correctionsrad R, das Fortschieben des Papieres, wenn ein Buchstabe gedruckt ist, geschieht durch die übrigen Nasen einer Daumenachse, durch Hebel- und Schaltwerke, die wir ebenso, wie die gleiche Stellung der Apparate beider Stationen und andere Nebenelemente hier nicht erörtern können. Der Drucktelegraph kann 100 bis 200 Buchstaben per Minute drucken, wenn die Leitung nicht zu lang ist; auf vielen Hauptlinien ist er schon eingeführt.

Fig. 339.



5. Der Pantelegraph von Caselli. Die chemischen Telegraphen haben folgende Grundidee: Auf der einen Station wird der Strom durch einen Schlüssel für kürzere oder

längere Zeit in dem Leitungsdrahte geschlossen; derselbe endigt auf der anderen Station mit einem Stifte, der einen mit leitender Flüssigkeit und mit einem zersetzbaren Stoffe getränkten Papierstreifen berührt; der el. Strom geht demnach durch das Papier auf eine leitende Unterlage und von da in die Erde; durch die chemische Zersetzung des Stoffes entsteht eine farbige Spur des Stiftes, die als Punkt oder Strich erscheint, wenn sich das Papier fortbewegt, u. der Strom für kurze oder längere Zeit geschlossen war. In Gintls chemischem Telegraph ist die Einrichtung des Morse'schen Receptors mit dieser Grundidee verbunden, welche erlaubt, das immer neu zu regulirende und schwächende Relais wegzulassen. Der zersetzbare Stoff ist bei Gintl Cyankalium mit Salzsäure und Kochsalz, der Stift besteht aus Eisen und erzeugt durch seine Einwirkung das blaue Cyaneisensalz; doch wird auch Jodkalium mit Stärke verwendet. In Bakewells Copirtelegraph ist das präparirte Papier um eine durch ein Uhrwerk bewegte Trommel gewunden, die durch ein Zahnrad eine parallel neben ihr liegende Schraube dreht; auf dieser sitzt eine Mutter, die einen auf dem Papier schleifenden Stift trägt, welcher auf demselben eng neben einander liegende Spiralen beschreibt; die Stellen dieser Spiralen, an welchen der Strom geschlossen ist, werden farbig. Das Schließen geschieht durch den ganz gleichen Manipulator auf der anderen Station, dessen Trommel ein leitendes Papier trägt, auf welches die Depesche mit nichtleitender Tinte geschrieben ist; der Strom ist also meist geschlossen, die Spiralen auf der anderen Station sind ganz blau mit Ausnahme der Stelle, bei welcher an der ersten

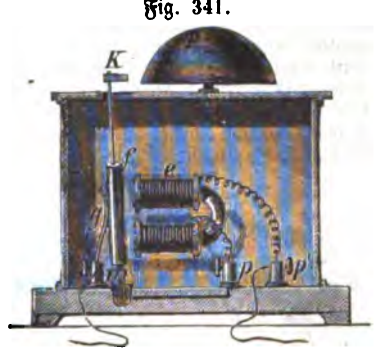
Fig. 340.

Station der Stift die Züge der Depesche berührte; dieselbe erscheint daher Weiß in Blau. Der Apparat hat keinen Eingang gefunden, weil die 2 Uhrwerke nicht in gleichen Gang zu bringen sind. Diese Aufgabe ist in Casellis Pantelegraph (Fig. 340) gelöst. Auf die hier unbewegliche Trommelfläche x ist an der Empfangstation das mit Blutlaugensalz getränkte Papier gebreitet, auf welchem der durch die Spindel pq gehaltene und in der Richtung pq fortbewegte Stift schleift: die Spindel wird mit ihrem Rahmen durch den nach unten gehenden Hebel auf der Trommelfläche hin- und hergedreht, der seine Bewegung von dem 2m langen Pendel L durch die Stange Z empfängt. Bei jedem Hin- und Hergange stößt eine im Hebel sitzende zweizinkige Gabel gegen Grenzstifte, greift dadurch mit ihren Haken in ein auf der Spindel sitzendes Zahnrad und dreht auf solche Weise dieses und die Spindel, so daß der Stift nach jeder Hin- und Herbewegung um $\frac{1}{3}$mm verschoben wird und dadurch bei geschlossenem Strome eng neben einander liegende parallele Linien von Berliner Blau erzeugt. Die Bewegung des großen Pendels wird erhalten durch die beiden Elektrom. E und E' und regulirt durch das Uhrwerk U, dessen Pendel 4 mal kürzer ist und daher doppelt so viel Schw. als das Pendel L macht. Der el. Strom der Localbatterie (unten links) geht durch die 2 Federn g und i dieses Uhrwerkes an die Schaltung F, die links und rechts an dem großen Pendelgestelle PQ in gleicher Art vorhanden ist. Bewegt sich das Pendel L nach links, so stößt die Gleitrolle V an demselben gegen eine Feder, welche dann 2 von einander getrennte Stellen der Stromleitung verbindet; der Strom geht jetzt an E', macht dieses magn., und zieht hierdurch die Pendellinse M an; in diesem Augenblicke hat auch das Pendel U eine Doppelschw. vollendet, die Federn g und i trennen sich, und der Strom ist geöffnet, die Linse M fällt zurück; ihre Pendelstange schließt dann gleich den Strom für E an der Schaltung rechts, nachdem g und i in Berührung gekommen sind, E wird ein M. und zieht die Linse an. So regulirt das Pendel U die Bewegung des Telegraphen. Derselbe App. findet sich auch auf der Abgangstation; um kleine, unvermeidliche Abweichungen vom Synchronismus zu erkennen, ist auf das Papier derselben eine gerade Linie gezogen, die sich auf der Empfangstation wieder als gerade Linie abbilden muß; geschieht dies nicht, so kann man durch Drehung an der Pendelschraube bei U den identischen Gang wiederherstellen. Auf der Abgangstation wird die Depesche auf eine leitende Zinnfolie mit nichtleitender Tinte geschrieben. Der pos. Poldraht geht zur Hauptleitung, sendet aber einen Zweig an den Stift, während die Trommelfläche mit dem neg. Erddrahte verbunden ist. So lange der Stift das Zinn berührt, geht demnach der pos. Strom durch den Stift in den neg. Erddraht; sowie aber der Stift die Tinte berührt, geht der pos. Strom nicht in den Zweig, sondern in die Hauptleitung auf die Empfangstation, und bringt dann so lange eine blaue Spur auf dem Papiere hervor, als der Stift der Abgangstation die Tinte berührt; es wird demnach jede Zeichnung getreu durch blaue Spuren nachgebildet.

6. Der transatlantische Telegraph. Weil bei jedem Stromschlusse eine gewisse Menge von El. in einen Leitungsdraht geführt wird, die an dem anderen Ende desselben in die Erde fließen muß, und weil bei der Stromöffnung diese El. noch einige Zeit braucht, bis sie gänzlich durch Abfluß in die Erde neutralisirt ist, und endlich, weil erst nach geschehener Neutralisation ein zweites telegraphisches Zeichen möglich ist, so kann bei einer sehr langen Leitung ein zweites telegraphisches Zeichen nicht unmittelbar nach dem ersten gegeben werden; es muß einige Zeit verfließen, die um so länger sein wird, je länger die Drahtleitung ist und je mehr Kraft die einzelnen Zeichen bedürfen. Aus diesem Grunde gibt der Drucktelegraph von Hughes bei langen Leitungen nur 30—100 Zeichen gegen 100—200 auf kurzen Strecken. Soll nun ein Leitungsdraht durch die Erde oder durch Flüsse oder Meere gehen, so erfährt seine El. noch Einwirkungen durch die Umgebung des Drahtes; derselbe muß nämlich eine isolirende Hülle von Guttapercha und über derselben zum Zwecke der Festigkeit und des Schutzes eine Hülle von Eisendrath erhalten. Die größte Sorgfalt wurde dem atlantischen Kabel 1865 gewidmet, da man aus mehreren verunglückten Kabellegungen das Nöthige erkannt hatte. Sieben Kupferdrähte wurden zu einem Seile verwunden, damit das Reißen eines Drahtes schadlos sei. Um die kleinsten Luftbläschen zwischen diesem Seile und der Guttaperchahülle unmöglich zu machen, wurde dasselbe zuerst mit einer Mischung von Guttapercha, Holztheer und Harz (Chatterton Compound) getränkt, was vor dem Aufpressen jeder der 4 Guttaperchahüllen wiederholt wurde. Die oberste Hülle erhielt einen dicken Ueberzug von Jutegarn mit Catechulösung gegerbt, und dieser Umzug wurde mit 10 Eisendrähten umwunden, von denen jeder mit 5 Strängen getheerten Manillahanfes umflochten war, um das Eisen vor dem Rosten zu schützen und das sp. Gew. des Kabels zu verkleinern. Das Eisen mußte fest wie Stahl und zähe wie Schmiedeeisen sein; das Kabel wurde bei jedem weiteren Schritte auf Leitung, Isolation und Festigkeit in jedem Theile geprüft. In einem solchen Kabel nun wirkt die pos. El. der leitenden Kupferader durch Influenz auf das Eisen, stößt dessen pos. El. hinaus und zieht die neg. in die Guttapercha; durch diese erfährt nun die pos. El. der Leitung selbst eine Anziehung und dadurch eine Verzögerung, wodurch sie an entfernten Stellen der Leitung später auftritt und auch

später verschwindet. Auch diese Wirkung ist um so stärker, je stärker die El. ist; demnach sind bei langen, submarinen Leitungen nur schwache Ströme anwendbar; schon deßhalb sind weder Elektromagnete, noch chemische Wirkungen für überseeische Telegraphen möglich; daher ist das nach dem Princip der Gauß'schen Spiegelablesung construirte Reflexgalvanometer von Thomson als Receptor für dieselben eingeführt worden. Ein noch nicht 2cm langes und 3mm breites und dickes Magnetstäbchen trägt ein kleines Glassilberspiegelchen, mit dem es zusammen noch nicht 1g wiegt, und ist, von dem Stromdrahtgewinde umgeben, n ein Gehäuse eingeschlossen, in dem es an einem Coconfaden hängt. In einiger Entf. (1m) steht ein breiter dunkler Schirm, hinter dem eine Lampe aufgestellt ist, von der durch einen etwas unter der Höhe des Spiegels angebrachten Spalt des Schirmes ein Lichtstrahlenbündel auf das Spiegelchen fällt, concentrirt durch eine vor demselben angebrachte Glaslinse; dieses Lichtbündel wird von dem Spiegelchen reflectirt auf eine etwas höher an dem Schirme angebrachte Elfenbeinskala, wo es eine schmale, leuchtende Linie, den Lichtzeiger bildet. Die Ablenkungen dieses Lichtzeigers von dem Nullpunkte nach links und rechts bilden die Elementarzeichen, aus denen das transatlantische Alphabet zusammengesetzt ist.

Fig. 341.



7. Elektrische Signale. Die Signalglocke mit einfachem Schlage besteht aus einem umwundenen Hufeisen, das beim Stromschlusse seinen federnden Anker anzieht und mit ihm einen an einer Verlängerung befestigten Klöpfel, wodurch derselbe gegen eine Glocke schlägt, und beim Oeffnen des Stromes durch seine Federkraft wieder zurückgeht. Das Schließen geschieht durch einen Druck auf den Knopf, wodurch ein federnder Theil des Stromkreises gegen einen andern federnden Theil desselben gepreßt wird, welche beim Aufhören des Druckes wieder von einander gehen. Da man den Druck öfter wiederholen kann, so kann man mit diesem Apparat auch klingeln; doch giebt es auch selbstthätige elektrische Klingeln (Fig. 341), die nach dem Princip des Wagner'schen Hammers construirt sind. Der pos. Poldraht steht mit einer Feder g in Verbindung, die den ebenfalls federnden Anker mf mit Klöpfel K berührt, der durch seine Federkraft etwas vom Hufeisen e und der Glocke T absteht; der Strom geht demnach durch Feder und Anker auf das Hufeisen an die neg. Klemme p'. Hierdurch wird der Anker angezogen und der Klöpfel gegen die Glocke geschlagen, gleichzeitig aber die Berührung mit der Feder und dadurch der Strom aufgehoben, weßhalb der Anker wieder zurückkehrt und so den Strom wieder schließt. Die el. Klingeln haben zahlreiche Anwendungen in Wohn- und Gasthäusern u. s. w. gefunden. Wichtig sind noch die Eisenbahn-Läutewerke, welche den Eisenbahnbeamten starke Glockensignale geben und durch Läute-Inductoren (531.) getrieben werden; das verbreitetste (von Kramer 1847) besteht aus einer durch ein Gewicht gedrehten und von einem Windfange regulirten und gehemmten Walze, welche eine Schlußscheibe mit 12 Fallen (Einschnitten am Rande) dreht. In diese Fallen fällt der eine Arm eines Hebels, wenn der andere durch den Auslösehammer frei ist und hemmt so das Werk; wird aber der Auslösehammer dnrch die Anziehung eines Hufeisens beim Stromschlusse losgelassen, so fällt er auf den zweiten Arm des Hebels, der erste geht aus der Falle, die Walze dreht sich und setzt einen Klöpfel in Bewegung.

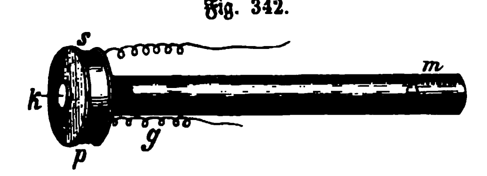
8. Die elektrische Uhr (Steinheil 1839). Die einfachste Constr. von Siemens und Halske besteht aus einem vom Stromdrahte umwundenen Hufeisen, das durch den Stromschluß magn. wird und dann einen Anker anzieht, welcher an einer Verlängerung einen rechtwinkelig auf dieser sitzenden Haken trägt und bei der Stromöffnung wieder in seine frühere Lage zurückkehrt. Der Haken greift in ein Zeigerrad, das 60 Zähne trägt, dreht dasselbe bei der ersten Bewegung um eine Zahnweite und geht bei der zweiten in den folgenden Zahn zurück. Wird also der Strom in einer Stunde 60mal geschlossen und geöffnet, so bewegt sich das Rad und mit ihm ein Zeiger in der St. einmal herum, gibt also die Min. an. Diese Schließung wird von der Normaluhr, einer gewöhnlichen Pendeluhr besorgt; auf der Achse des Minutenrades derselben sitzt ein Elfenbeinrädchen, das mittels einer Nase in jeder Min. einmal auf den einen Arm eines Hebels drückt, an dessen Stützpunkt der eine Poldraht gelangt; durch diesen Druck wird der andere Arm des Hebels gehoben und dadurch in Verbindung mit der Stromleitung gebracht, der Strom geschlossen; ist die Nase an dem Hebel vorbei, so kehrt derselbe wieder in seine frühere Lage zurück, der Strom ist geöffnet.

9. Das elektrische Chronoskop (Hipp 1850) mißt sehr kurze Zeiten, z. B. die Fallzeit einer aus geringer Höhe fallenden Kugel, die Zeit, in welcher eine abgeschossene Kugel 1m zurücklegt u. drgl. Es besteht aus einem sehr feinen und genauen Uhrwerke, mit

zwei Zifferblättern, welche Hundertel und Tausendtel von einer Sec, angeben, und welche durch einen Elektrom. außer Verbindung mit dem Uhrwerke gesetzt werden, sowie der Strom desselben geschlossen ist. Wird aber dieser Strom für kurze Zeit geöffnet, so gehen die Zeiger wieder, und aus ihrem Wege erkennt man die Zeit der Stromöffnung. Um z. B. die Fallzeit zu messen, geht der Draht zuerst um das Hufeisen der Uhr, dann zu einem Galgen an 2 Federn, zwischen denen die Fallkugel sitzt, und dann zur Kette zurück; von den beiden letzten Drahttheilen gehen indeß auch Zweige zu 2 Theilen eines Brettes unter dem Galgen, die 2 sich nahezu berührende Metallstreifen tragen. Der Strom ist in diesem Falle oben an der Kugel geschlossen, an dem Doppelbrette aber nicht; sowie aber die Kugel fällt, wird oben der Strom geöffnet und erst wieder geschlossen, wenn die Kugel auf das Brett schlägt und dadurch die Metallstreifen in Berührung bringt. Die Zeit der Stromöffnung, die an den Zifferblättern abgelesen wird, ist die Fallzeit. Eine Anwendung dieses Principes wird auch an den Phonautographen gemacht.

10. Das **Telephon** von Philipp Reis (1860) war ein interessanter Anfang zur Lösung der Aufgabe, Töne zu telegraphiren. Der Ton wird mittels eines Mundstückes in ein Holzkästchen geleitet, das oben durch eine Membran geschlossen ist, zu deren beiden Seiten die Poldrähte einer Batterie an Klemmen befestigt sind. An die eine Klemme geht von der Mitte der Membran ein dünnes Platinstreifchen, an die andere der eine Schenkel eines Metallwinkels, dessen Scheitel über der Membranmitte einen das Platinstreifchen beinahe berührenden Stift trägt. Da der Ton die Membran in Schw. versetzt, so wird durch jede hinreichend starke Schw. das Streifchen gehoben und mit dem Stifte in Berührung gebracht; sind also die Schw. stark genug, so entstehen so viele Stromunterbrechungen, als der Ton Schw. enthält. Nun ist in den einen Poldraht an entfernter Stelle auf einem Resonanzboden eine Spirale mit einem Metallstäbchen eingeschaltet; in diesem wird durch die Stromunterbrechung der Ton reproducirt.

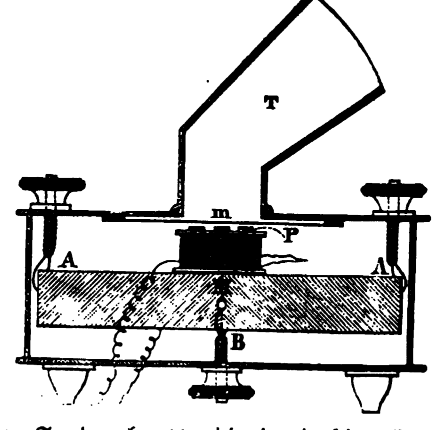
Fig. 342.



Das Telephon von Bell (1872—77) pflanzt nicht nur Töne, sondern auch die Sprache fort und zwar durch Inductionsströme, die von den Schallschw. hervorgerufen werden. Dasselbe besteht (Fig. 342) aus einem starken Stahlm. mg mit einer Fortsetzung k aus weichem Eisen, auf welcher eine Spule sp sitzt, die zahlreiche Windungen eines feinen mit Seide übersponnenen Kupferdrahtes enthält. Ganz nahe vor der Vorderfläche der Spule und ihres Eisenkerns k befindet sich das Hauptelement des Apparates, eine sehr dünne, sehr elastische kreisförmige Eisenplatte oder Eisenlamelle, das Diaphragma. Vor dieser Lamelle befindet sich der Holzdeckel des Apparates, der in der Mitte eine trichterförmige Oeffnung trägt, an welche man den Mund hält beim Sprechen und das Ohr beim Hören. Dieser Holzdeckel drückt die Eisenlamelle mit ihrem Rande gegen die ringförmige Stirnfläche einer weiten die Spule umgebenden Holzhülle, so daß ein großer kreisförmiger Theil der Lamelle frei bleibt. An diese weite, kurze Hülle schließt sich eine engere und längere Holzröhre, die den M. umschließt, und welche an ihrem hinteren Ende 2 Klemmschrauben trägt, mit welchen die 2 Drahtenden der Spule verbunden sind. Von den Klemmschrauben gehen zwei Leitungsdrähte auf die andere Station an die Klemmschrauben eines ganz gleichen Hörtelephons. Wird nun durch die Mundöffnung ein Schall in das Sprechtelephon geleitet, so geräth die Lamelle in Schw., nähert und entfernt sich von dem polartig starken Kerne der Spule, wodurch ihr Influenzms. abwechselnd verstärkt und geschwächt wird. In Folge dessen wird auch der Ms. des empfindlichen, weichen Eisenkernes in dem Tempo und gemäß der Stärke der Schw. abwechselnd verstärkt und geschwächt. Jede Schwankung des Ms. des Eisenkerns aber erzeugt in der Spule Inductionsströme, die an Stärke und Dauer gerade so wechseln wie die Schw. der Lamelle. Diese Inductionsstr. werden durch die Leitungsdrähte auf die andere Station in das Hörtelephon geführt, fließen dort durch die Spule in demselben Wechsel von Stärke und Dauer wie in dem Sprechtelephon und bringen daher in dem Kerne der Spule dieselben Schwankungen des Ms. hervor wie in dem Spulkerne des Sprechapparates. Deßhalb wird die Lamelle des Hörtelephons bald stärker, bald schwächer angezogen, geräth daher in dieselben Schw. wie die Lamelle des Sprechtelephons und bringt demnach auf das Ohr dieselben Wirkungen hervor. Wegen der zweimal stattfindenden Uebergänge von Wellenbewegungen, wegen der zweifachen Verwandlung von Ms. und El., sowie wegen des Leitungswiderstandes der Leitungsdrähte findet eine bedeutende Schwächung des Schalles statt. Trotz dieser Schwäche des reproducirten Schalles hat das Telephon eine kaum erwartete Ausdehnung gefunden. In zahlreichen verbesserten Constr. ist die Wirkung wesentlich verstärkt worden, obwohl weder neue Ideen Eingang gefunden haben, noch auch die objective Hörbarkeit erreicht ist. Am nächsten scheint derselben **Böttchers Telephon** (1881) zu kommen, da dessen deutliche Sprache 1m weit deutlich vernehmbar ist; es enthält auch

insofern eine neue Idee, daß der M. die Schw. mitmacht. Der Magnet M (Fig. 343) wird durch die 2 gespannten Stahldrähte A und B schwebend erhalten, kann sich also der Lamelle m bei deren Voranschwingen nähern und bei deren Zurückschwingen weiter entfernen; durch diese vergrößerten Amplituden sind im Sprechtelephon die Schwankungen des Ms. und dadurch die Inductionsströme stärker und im Hörtelephon die Schw. der Lamelle beträchtlicher. — In Deutschland sind am verbreitetsten die Telephone von Siemens u. Halske (1878), in denen der Eisenkern des Bell'schen Telephons durch 2 drahtumwundene Bandmagnete ersetzt ist; eine Zungentrompete mit einem metallenen Verstärkungskügelchen erzeugt ohne Element im Hörtelephon einen so lauten Klang, daß derselbe selbst in einer gefüllten Schulklasse von Jedem gehört wird. Indessen zieht man es bei der praktischen Anwendung doch vor, mittels einer Batterie durch eine el. Klingel einen starken Anruf zu geben. In Amerika hält man dies um so weniger für störend, da man dort ohnedies eine Batterie nöthig hat, indem statt des Sprechtelephons ein Mikrophon als sogenannter telephonischer Sender benutzt wird, der in seiner Einrichtung an das Reis'sche Telephonkästchen erinnert.

Fig. 343.



11. Das Mikrophon (Berliner 1877, Lüdtge 1878, Hughes 1878) hat seinen Namen davon, daß mittels desselben die leisesten Geräusche, wie z. B. der Gang einer Fliege gehört werden können. Der Grundgedanke des App. ist am einfachsten aus Fig. 344 zu verstehen: Der Strom der Batterie B geht durch die beiden Kohlengraphitplatten K und den Kohlenstift a in das Telephon T; durch die Schw. eines Schalles, der in der Nähe des Mikrophons aK entsteht, wird der Widerstand des Stromkreises im Tempo der Schw. verändert und dadurch auch die Stromstärke und die magnetische Wirkung auf das Telephon in demselben Tempo vergrößert oder verkleinert, womit die starke Schallwirkung des Telephons erklärlich ist. Ein Mikrophon ist also ein leitender, am besten ein poröser Körper, der lose, aber in völligem Schlusse in eine Stromleitung eingeschaltet ist; es soll den Strom nicht, wie im Reis'schen Telephon unterbrechen, sondern nur seinen Widerstand im Tempo der Schw. verändern. Hieraus ist ersichtlich, daß es zahllose Mikrophoneinrichtungen geben kann. Wie man mit der eben beschriebenen den Gang einer Fliege hören kann, ist in Fig. 345 dargestellt, wo c und c' die 2 Kohlenplatten, A den Stift, B ein Resonanzbrettchen und H die Unterlage des App. bezeichnet. Ein Mikrophon, das zum Hören

Fig. 344.

Fig. 345.

feinster Geräusche eingestellt ist, gibt mit der gewöhnlichen Sprache ein knackendes Gewitter, in welchem die Sprache völlig verschwindet; für diesen Zweck muß der Druck an der Contactstelle, wo der lose Leiter eingeschaltet ist, verändert und zwar hier verstärkt werden, damit die Schwingung weniger stark und die Stromverbindung inniger sei. Dieses Einstellen oder Adjustiren des Contactes bildet die Schwierigkeit des Mikrophons und macht es für Ungeübte weniger leicht nutzbar als das Telephon für sich allein. Trotzdem hat das Mikrophon als telephonischer Sender oder Transmitter vielfach Aufnahme gefunden: auf jeder Station ist ein Telephon und ein Transmitter, gegen den Transmitter spricht man, mit dem Telephon hört man. In Amerika ist besonders **Berliners Transmitter** gebräuchlich, ein Holzkästchen a mit einem eisernen Deckel b; in Fig 346 ist das Kästchen geöffnet dargestellt, der Deckel b um das Charnier c umgeschlagen, während Fig. 347 einen Durchschnitt des Deckels zeigt. Der Strom eines Leclanché-Elementes geht durch die Klemme 1 zu der Feder u, die bei geschlossenem Deckel die Schraube l des Deckels berührt, geht durch diese Schraube und die Neusilberfeder k auf das Graphitblättchen i, das auf der Eisenlamelle f des Mundstücks e befestigt ist und mit dem abgerundeten, gelenkig aufgehängten Graphitcylinder r den Contact bildet, fließt durch dessen Halter q und eine zweite Neusilberfeder p auf den Deckel und durch dessen Charnier c und einen von hier ausgehenden Draht s o auf die Hauptspule des Inductors t, und geht dann durch den punktirten Draht auf die Klemme 2, wo der andere Poldraht des Leclanché eingeschraubt ist. Durch das Sprechen in das Mundstück e geräth die von dem Gummiring g gehaltene Lamelle f in Schw. und mit ihr das Graphitblättchen i, so daß hier in dem Contact mit dem Graphitcyl. r die Stromschwankungen im Tempo der Schw. erzeugt werden. Hierdurch entstehen in der Inductionsspule des Inductors t die Inductionsströme, die das Telephoniren bewirken; das eine Drahtende dieser Spule steht mit der Klemme 3 in Verbindung, von der die Liniendrahtleitung nach der anderen Station geht, das andere mit der Klemme 4, in deren nach der Erdplatte gehenden Draht das Telephon eingeschaltet ist. — Außer der Telephonie soll das Mikrophon noch Anwendung ermöglichen, um Harthörigen oder gar Tauben das Hören zu erleichtern; um durch Geräusche erkrankter Organe im Innern des Menschen oder der Thiere die Art der Erkrankung zu erkennen, ähnlich wie das Stethoskop; um Erdbeben zu messen oder aufzuzeichnen, als Seismometer oder Seismograph; um verborgene Quellen zu entdecken u. s. w.

Fig. 346.

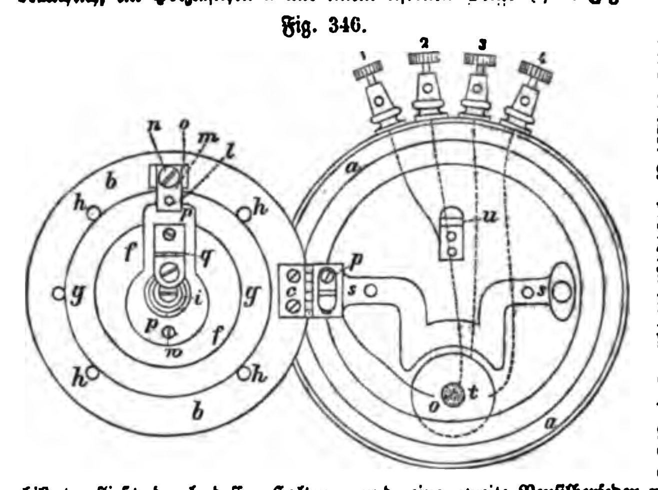
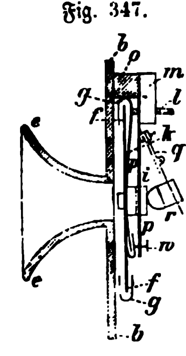


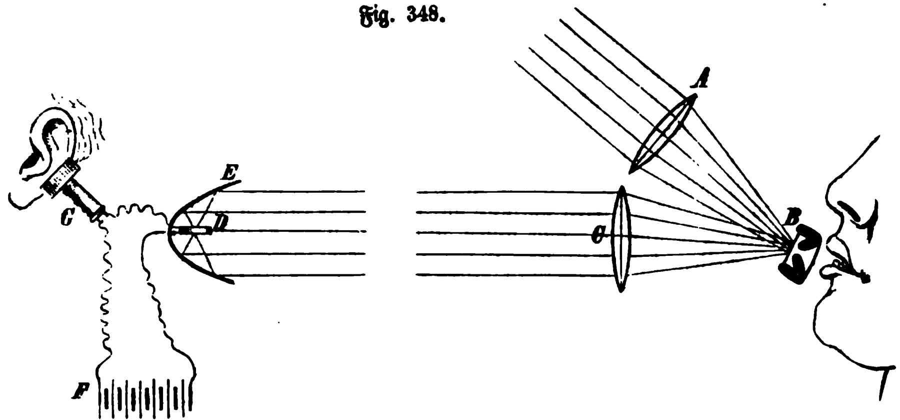
Fig. 347.



12. **Das Photophon** (Bell u. Tainter 1880) ist ein Apparat zur Fortpflanzung des Schalles durch intermittirende Belichtung einer Selenzelle, die mit einem Telephon in den Stromkreis einer Batterie eingeschaltet ist. Die Photophonie beruht also auf der Leitungsfähigkeit des krystallinischen Se, die schon Hittorf (1852) entdeckt hatte, und welche nach der Entdeckung von Willoughby Smith (oder eigentlich seines Gehilfen May 1873) durch Belichtung bedeutend vergrößert wird. Während die Selenbarren Smiths einen Widerstand von 1400 Megaohms hatten, gelang es Tainter, Selenzellen anzufertigen, deren Widerstand im Dunkeln nur 300 Ohms und im Licht nur halb soviel betrug. Die Selenzellen wurden anfänglich nach Siemens' Methode hergestellt; auf ein Glimmerblättchen wurden feine zickzackförmige Platin-, Eisen- oder Kupferdrähte gelegt, auf diese ein Tropfen geschmolzenes Se geträufelt und darauf ein zweites Glimmerblättchen gedrückt, wodurch das Se den Raum zwischen den Drähten erfüllte. Diese Zelle wurde nun in einem Paraffinbade einige Stunden auf 210° erhitzt und dann sehr langsam abgekühlt; sie hatte aber dann noch

Bell immer noch wenigstens 1/4 Megaohm Widerstand. Tainter erkannte später das chemisch auf das Se wirkende Messing als viel vortheilhafter, strich über die erhitzte Messingdrahtzelle mit einer Selenstange hin und erhitzte den entstehenden glasigen Ueberzug, bis er anfing zu schmelzen und danach metallisch, krystallinisch und granulirt erschien, nur noch den genannten kleinen Widerstand und hohe Lichtempfindlichkeit besaß. Eine solche Selenzelle D wird nun in dem Brennpunkte eines parabolischen Hohlspiegels E (Fig. 348) in den Stromkreis einer Batterie F eingeschaltet, der an der Hörstelle ein Telephon G enthält. In einer Entf., die

Fig. 348.



bis auf 200 m steigen kann, befindet sich der Sprechapparat, ein Mundstück, das mit einem Spiegel von versilbertem Glimmer oder Mikroskopglas geschlossen ist. Auf diesen fällt durch eine Linse A concentrirtes Licht, das nach seiner Reflexion von dem Spiegel durch eine zweite Linse C in parallele Strahlen verwandelt wird. Da nun der dünne Spiegel durch den Schall in Schw. versetzt wird, so undulirt das reflectirte Strahlenbündel hin und her, trifft und verläßt im Rythmus der Schallschw. die Selenzelle, wodurch diese in demselben Tempo leitend und wieder nicht leitend wird und demnach in demselben Rythmus Stromstöße durch das Telephon sendet, die den Schall reproduciren.

Zehnte Abtheilung.

Die Physik des Himmels (Astronomie).

1. Die Erde als Weltkörper.

Die Physik des Himmels betrachtet die Bewegungen und Eigenschaften der Welt- oder Himmelskörper. Unter Himmelskörpern versteht man Sonne, Mond und Sterne. Die Sterne kann man eintheilen in Fixsterne, Planeten, Kometen und Sternschnuppen. Der gewöhnliche Sprachgebrauch bezeichnet nur Fixsterne und Planeten mit dem Ausdruck Sterne, da nur diese beiden Gattungen als leuchtende und strahlende Himmelspunkte erscheinen, während die Kometen als größere oder kleinere Lichtwolken, manchmal mit einem sternartigen Kerne, und die Sternschnuppen als plötzlich aufblitzende, rasch hinschießende und verschwindende Himmelsfunken auftreten. Fixsterne und Planeten sind für das gewöhnliche, natürliche Sehen nur darin verschieden, daß die Fixsterne zitterndes, die Planeten aber ruhiges Licht besitzen; bei längerer Beobachtung zeigt sich noch darin ein Unterschied, daß die Fixsterne ihre gegenseitige Stellung nicht merklich ändern, während die Planeten zwischen den Fixsternen hin- und herwandeln, ein Unterschied, von dem die Namen herrühren (πλανάομαι, herumschweifen). Da die Bewegungen der Weltkörper von der Erde aus beobachtet und gemessen werden, so müssen wir zuerst die Gestalt, Größe und Bewegung der Erde ins Auge fassen. 536

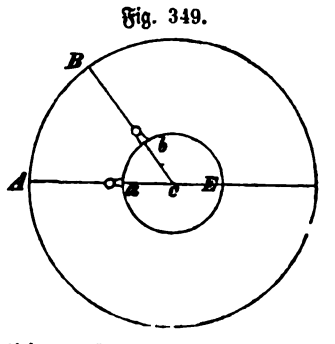
1. **Die Gestalt der Erde** (Pythagoras 540 v. Chr., Eudoxus 380 v. Chr., Aristoteles 384—322 v. Chr.). Die Erde ist eine frei im Weltraume schwebende Kugel. Daß sie frei im Weltraume schwebt, folgt daraus, daß wir an keiner Stelle eine materielle Verbindung mit einem anderen Weltkörper, sondern überall den freien Weltraum über uns wahrnehmen. Als Beweise für die Kugelgestalt werden gewöhnlich angeführt: 1. Der Horizont, d. i. der Theil der Erde, den wir überblicken können, hat überall eine kreisförmige Gestalt und einen viel kleineren Durchmesser, als er bei ebener Erdoberfläche haben müßte. 2. Der Horizont erweitert sich bei Erhöhung des Standpunktes. 3. Hohe Gegenstände, die aus großer Entfernung uns näher kommen, erscheinen zuerst mit ihrer Spitze und treten erst allmälig mit ihren unteren Theilen hinter dem Horizont hervor; die umgekehrte Erscheinung zeigen sie, wenn sie sich allmälig von uns entfernen. 4. Sonne, Mond und Sterne gehen an Orten, die in ostwestlicher Richtung eine verschiedene Lage haben, zu verschiedener Zeit auf und unter. 5. Bei raschem Reisen tauchen immer neue Sterne vor uns auf und sinken hinter uns unter den Horizont. 6. Bei den vielfachen Reisen, die nach allen Richtungen auf der Erde unternommen wurden, hat man niemals schroffe, sondern immer allmälige Veränderungen der Erdoberfläche im großen Ganzen wahrgenommen, und gelangt beim Einhalten derselben Richtung nach derselben Gegend zurück. 7. Bei den Mondfinsternissen hat der auf den Mond fallende Erdschatten immer eine kreisförmige Begrenzung. 8. Sonne, Mond und Planeten haben Kugelgestalt. 9. Jede unabhängige Flüssigkeit nimmt Kugelgestalt an, und man hat Gründe zu der Annahme, daß die Erde einst flüssig war.

Bei Homer ist die Erde eine ruhende Scheibe, vom Okeanos umströmt; Thales (650 v. Chr.) hielt sie für eine auf Wasser schwimmende Scheibe, Anaximander (550 v. Chr.) für einen schwimmenden Cylinder. Pythagoras, Eudoxus und Aristoteles erklärten sie für eine Kugel. Ad 1 und 2. Wäre die Erdoberfläche eine Ebene, so würde der Horizont sich viel weiter als 1/2 M. erstrecken, während ein auf freiem, ebenem Felde stehender Beobachter nur diese Entf. ringsum durchblickt; außerdem würde eine Erhöhung des Standpunktes den Hor. nicht vergrößern. Wäre die Erdgestalt sehr von der Kugelgestalt verschieden, so müßte der Hor. nach verschiedenen Richtungen eine verschiedene Größe haben. Nur bei der Kugel ist er überall kreisförmig: denn der Hor. wird von den ins Auge gelangenden Lichtstrahlen begrenzt, welche an die Erde ringsum tangiren, und nur bei der Kugel bilden die von jedem äußeren Punkte an den Körper gezogenen Tangenten durch ihre Berührungspunkte einen Kreis. Eine Tangente ist nach einem bekannten geom. Satze die mittlere geometrische Proportionale zwischen der Höhe des Beobachters und der Summe dieser Höhe und des Erddurchmessers; kennt man also den Erddurchmesser, so kann man auch für jede Beobachtungshöhe die Weite des Hor. berechnen, und findet dieselbe, abgesehen von den durch die Refraction entstehenden Abweichungen, der Beobachtung entsprechend. Ad 3. Wäre die Erde eine Scheibe, so müßte ein auf derselben näher kommender Gegenstand, z. B. ein Schiff, ein Inselberg, wie der Pic von Teneriffa sofort ganz sichtbar sein; das allmälige Hervortreten, zuerst der Spitze, dann mittlerer Theile und endlich erst des Fußes spricht für die Krümmung der Erde. Auf einer Scheibe dürfte ein Gegenstand erst verschwinden, wenn (342.) sein Gesichtswinkel 1/2′ klein wäre, der Pic von Teneriffa also in 900 M. Entf., während er selbst mit den besten Fernrohren in 30 M. Entf. nicht mehr sichtbar ist. Ad 4. Wäre die Erde eine Ebene, so müßten die Himmelskörper für alle Erdbewohner gleichzeitig über den Hor. treten, und gleichzeitig hinter demselben verschwinden, nachdem sie ihre ostwestliche Bahn oberhalb des Hor. beendigt hätten. Nun gehen aber für alle Erdbewohner, die in ostwestlicher Richtung gleich weit von einander entfernt sind, die Sonne und die übrigen Gestirne gleich viel später auf und unter, was nur möglich ist, wenn die Erde Kugelgestalt hat. Ad 5. Reist man in nordsüdlicher Richtung, so erheben sich nach gleichen zurückgelegten Wegen immer gleiche, durch neue Sterne bezeichnete und erkennbare Himmelsräume vor uns aus dem Hor. und verschwinden hinter uns unter dem Hor.; dies ist nur möglich, wenn die Erde nordsüdlich eine kreisförmige Krümmung hat. Die Abweichungen von dieser nicht ganz genau geltenden Regel werden wir sogleich näher betrachten. Bei Reisen in anderen Richtungen treten dieselben Erscheinungen ein, wenn man die ostwestliche Bewegung des Himmels abrechnet; folglich hat die Erde nach allen Seiten kreisförmige Krümmungen. Ad 6. Die schroffen Abstürze oder sanften Abhänge, die man in Gebirgen auf Reisen trifft, bilden keine Abweichung von der Kugelgestalt; sie sind gegen die Größe der Erde gehalten

sehr klein. Die erste Umschiffung der Erde geschah durch Ferdinand Magelhaen (1519—22); seitdem geschahen noch viele Reisen um die Welt nach vielerlei Richtungen; immer gelangte man in entgegengesetzter Richtung an den Ort zurück, von dem man ausgegangen war. Ad 7. Auch andere Körper, wie Cylinder, Kegel können einen kreisförmigen Schatten werfen, aber nur in einzelnen ganz bestimmten Stellungen; der bei Mondfinsternissen auf den Mond fallende Erdschatten ist aber immer kreisförmig; einen kreisförmigen Schatten in allen Stellungen gibt nur die Kugel. Ad 8. Die Erde ist ein verhältnißmäßig kleiner Weltkörper; die Sonne, Jupiter und Saturn sind größer und haben Kugelgestalt; Venus und Merkur sind näher bei der Sonne und besitzen dieselbe Form; der Mars hat ungefähr dieselben Verhältnisse wie die Erde und ebenfalls Kugelgestalt; auch der Mond und die Satelliten des Jupiter stimmen in der Form mit den genannten Körpern überein. Wenn es nun auch sehr kleine von der Kugelform abweichende Weltkörper, die Sternschnuppen, und sehr große ganz abnorme Erscheinungen, wie die Kometen, von den seltsamsten Gestalten gibt, so ist doch die Kugelform bei den der Erde ähnlichen Weltkörpern so verbreitet, daß dieselbe auch für die Erde vermuthet werden muß. Ad 9. Die Geologen nehmen meist an, daß die Erde jetzt noch im Inneren feurigflüssig sei, und führen als Gründe für diese Hypothese an: die Zunahme der Erdwärme um 1° für je 30m Entf. von der Oberfläche nach innen, die warmen Quellen, die Vulkane, die Erdbeben u. s. w. Ist die Erde jetzt noch im Innern feurigflüssig, so war sie einstens ganz flüssig und mußte dann, wie jede unabhängige flüssige Masse, Tropfen, Plateaus Kugel u. s. w. Kugelgestalt annehmen.

Da nach allen Richtungen über dem Horizont bei Nacht Himmelskörper wahrgenommen werden, deren Entfernungen von uns wir wegen der Größe derselben nicht abschätzen können und deßwegen für sehr groß und einander gleich halten, so erscheint uns der Himmel über dem Horizont als eine Halbkugel, und da für den Himmelsraum unter dem Horizont Gleiches gilt, so gewöhnen wir uns, den Himmel als eine um die Erde gespannte Hohlkugel anzusehen, deren Mittelpunkt mit dem der Erdkugel zusammenfällt. Himmel und Erde sind also concentrische Kugelflächen. Den Himmelspunkt über unserem Haupte, also den Endpunkt der Verlängerung unseres Erdradius bis an die Himmelskugel über uns, nennen wir Scheitelpunkt oder Zenit, den Endpunkt der Verlängerung bis an die Himmelsfläche unter uns dagegen Fußpunkt oder Nadir. Ginge man genau in einem Kreise um die Erde, so würden alle Scheitelpunkte genau einen concentrischen Himmelskreis bilden; nach dem Zurücklegen eines Halbkreises, eines Quadranten, eines Grades auf der Erde hätte auch der Zenit die Hälfte, einen Quadranten, einen Grad des Himmelskreises zurückgelegt, vorausgesetzt, daß die Erde eine vollkommene Kugel ist; die Scheitelpunkte A und B zweier Erdorte a und b (Fig. 349) sind am Himmel ebenso viele Bogengrade von einander entfernt als die Erdorte; man findet daher die Gradentfernung zweier Erdpunkte von einander, indem man die Grade des Bogens eines durch ihre beiden Zenite gehenden größten Himmelskreises mit dem Theodolit mißt.

Fig. 349.



Die Gestalt der Erde ist nicht eine vollkommene Kugel, sondern an zwei diametralen Stellen abgeplattet; die Abplattung beträgt nach Bessel 1/299, d. h. der kleinste Durchmesser ist um 1/299 kleiner als der größte. Legt man in der Richtung des kleinsten Durchmessers Schnittebenen durch die Erde, so erscheinen dieselben als nach beiden Enden dieses Durchmessers hin schwächer gekrümmte, kreisähnliche Ellipsen. Dreht man eine Ellipse um den kleinsten Durchmesser, so entsteht ein Körper, den man Sphäroid nennt, und dessen Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser Kreise sind. Sind diese Schnitte bei der Erde auch Kreise, so ist die Erde ein sehr kugelförmiges Sphäroid. Die Abplattung wurde aufgefunden und bestimmt durch Gradmessungen; man fand, daß ein Grad eines durch den kleinsten Durchmesser gedachten Kreises in Lappland = 57437 Toisen, in Peru = 56753 Toisen, daß also

der Grad nach Norden zu größer wird. Nachgewiesen wurde sie durch Pendelversuche: ein und dasselbe Pendel macht nach Norden zu immer mehr Schwingungen in derselben Zeit, und umgekehrt muß das Secundenpendel nach Norden zu länger gemacht werden (140.). Hieraus folgt, daß die Schwere nach Norden zu wächst, was sich nur durch Mitwirkung der Abplattung erklärt. Die Abplattung erklärt man durch die Wirkung der Centrifugalkraft im feurigflüssigen Zustande der Erde (Plateaus Versuch, die Kugel aus Blechringen auf der Schwungmaschine (141. und 152.) eine Thonkugel auf einer Drehscheibe). Die genauere Untersuchung der Resultate älterer und neuerer Gradmessungen haben zu der Vermuthung geführt, daß die Abplattung an verschiedenen gleichweit nördlich gelegenen Orten nicht dieselbe ist, und daß die Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser ebenfalls nicht genau Kreise sind, daß also das Sphäroid nicht genau die Gestalt der Erde wiedergibt, daß die Erde in westöstlicher Richtung ebenfalls eine Art von Abplattung besitzt; zur genaueren Entscheidung über diese Vermuthung hat General Baeyer eine neue westöstliche Messung einer Länge von Irland bis zur Ostgrenze von Europa veranlaßt.

Die Abplattung wurde zuerst von Newton aus dem flüssigen Urzustande der Erde geschlossen und unter der Annahme, daß die Erde überall gleiche Dichtigkeit besitze, — 1/230 berechnet. Durch Richers Reise von Paris nach Cayenne und zurück (1672) erhielt Newtons Schluß die erste Bestätigung. Richer fand nämlich, daß eine von Paris mitgenommene Uhr in Cayenne täglich 148 Sec. nachging, und für Cayenne regulirt, nach der Rückkehr nach Paris 148 Sec. vorging. Die hierin ausgesprochene Verminderung der Schwerkraft rührt aber nicht blos von der Abplattung, sondern auch von der Centrifugalkraft der Erde ([illegible]) her. Die Centrifugalkraft allein vermindert die Schwere am Aequator um 1/289; der zu der Verminderung, welche bekanntlich 1/200 beträgt, fehlende Betrag rührt von der Abplattung her. Berechnet man die Größe der Schwerkraft mit Berücksichtigung der Abplattung und der Centrifugalkraft an verschiedenen Orten der Erde, und bestimmt dieselbe dann mittels Pendelversuchen experimentell, so erhält man dieselben Resultate, worin eine Bestätigung der Abplattung und ihrer angegebenen Größe liegt. Die erste genauere Bestimmung wurde mit der ersten genauen Messung verschiedener Grade möglich; die peruanische Gradmessung geschah 1735 durch Bouguer, Condamine und Godin, die lappländische 1736 durch Maupertuis, Clairaut und Outhier. Aus diesen Messungen berechnete Bessel die Zahl 1/299. Mit Berücksichtigung neuerer Gradmessungen findet James 1/294, während Sabines (1823) Pendelversuche im hohen Norden 1/289 ergeben.

537 **2. Die Größe der Erde** (Eratosthenes 200 v. Chr., Bessel 1837). Aus der Länge eines Grades einer Kugel kann man durch Multiplication mit 360 die Länge des Umfanges eines größten Kreises und hieraus durch Division mit 2π den Halbmesser berechnen. Verwickelter wird die Methode bei einem Sphäroid. Bessel hat aus den 10 besten Gradmessungen, die 50° 34′ umfassen, den größten und den kleinsten Halbmesser berechnet und den ersten = 859,4367 M., den letzten = 856,5637 M., die Abplattung = 1 : 299,1528 gefunden. Der größte Durchmesser der Erde ist demnach 1719, der kleinste 1713 M.

Schon Eratosthenes hatte den Erdumfang zu 250 000 Stadien bestimmt; er beobachtete, daß zu Syene die Sonne zur Zeit des höchsten Sommers gerade im Zenit stand, während sie zu Alexandrien zu derselben Zeit 7½° vom Zenit entfernt war. Hieraus schloß er, daß die beiden Orte 7½° von einander entfernt seien, und da diese Entf. 5000 Stadien betrug, so konnte er die Länge von 1° berechnen. Im 9. Jahrh. ließ der Kalif Al-Mamun einen Bogen von 20° mit Stäben sorgfältig messen. Ferrel maß 1525 die Strecke von Paris bis Amiens durch die Zahl der Umdrehungen seiner Wagenräder, und fand so 1° = 57070 Toisen. Genauer wurden die Messungen erst, als Snellius die Methode der Triangulation einführte, nach welcher die zu messende Strecke in ein Netz von Dreiecken gefaßt wird, von denen nur eine Seite, die Basis der ganzen Messung, mit größter Genauigkeit gemessen, die übrigen aber mittels der Basis und der ebenfalls durch die genauen Winkelinstrumente sehr genau auffindbaren Winkel berechnet werden. — Nach den Bessel'schen Zahlen ist die Oberfläche der Erde = 9 279 848, also beinahe = 10 M. Quadratmeilen und der Inhalt der Erde = 2650 Mill. Kubikmeilen. Wäre die Erde von Wasser, so würde sie 1 082 647 Trillionen, etwas mehr als 1 Quadrillion kg wiegen.

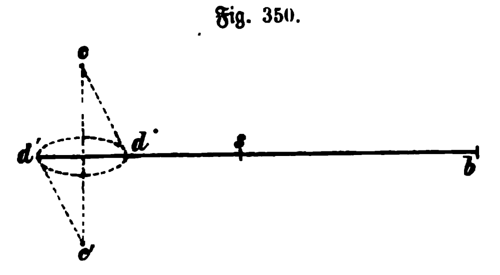
3. Die Dichte der Erde liegt nach zahlreichen Beobachtungen zwischen 5 und 7, d. h. die Erde wiegt 5—7mal soviel, als wenn sie von Wasser wäre, also 5—7

rillionen kg. Da die Oberflächenschichten nur eine Dichte von 2—3 haben,
ß das Innere der Erde dichter sein. Die Methoden zur Bestimmung der
sind folgende: 1. Die Drehwage oder das wagrechte Pendel unter dem Ein-
der Anziehung sehr großer Gewichte. 2. Die Ablenkung eines Pendels durch
Berg von bekannter Masse. 3. Die Vergleichung der Pendelschwingungen
er Erdoberfläche mit solchen auf der Spitze eines Berges oder in der Tiefe
Schachtes. 4. Das Horizontalpendel von Zöllner (1869) oder die Pendel-
von Lorenz Hengler (1832).

1. Die Methode der Drehwage von John Mitchell (1759) wurde zuerst von
dish (1797) angewendet; an einem stark construirten zweiarmigen Hebel befanden sich
eits Gewichte von mehr als 3 Ctr., zwischen denen an einem feinen Silberfaden ein
Hebel mit 2 kleinen Metallkugeln an den Enden schwebte. Die großen Kugeln wurden
solche Lage gebracht, daß die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte nicht senkrecht auf
eien Hebel stand; dann wurden die kleinen Kugeln angezogen und so der kleine Hebel
t, wodurch derselbe durch Mitwirkung der Torsion in Schwingungen gerieth, die aus
er Entf. durch ein Fernrohr beobachtet wurden. Aus der Vergleichung dieser Schwing-
hl und der dieselbe erzeugenden Gewichte mit der Schwz. eines gewöhnlichen Pendels
man das Gewicht der Erde berechnen, und Cavendish fand so die Erddichte = 5,45.
e Methode, vervollkommnet und mit Berücksichtigung aller Fehlerquellen, schlug Reich
ein und fand 5,44, während Baily's (1842) zahlreiche Versuche die etwas größere
,56 ergaben. — 2. Maskelyne und Hutton (1772) hängten zu beiden Seiten des
Shehallian in Perthshire an Punkten, deren linearer und Bogenabstand genau ge-
war, Pendel auf. Durch den Berg wurden die Pendel etwas aus ihrer Lage seit-
nach dem Berge zu abgelenkt, machten also einen größeren Winkel mit einander als
ogenabstand der beiden Punkte. Durch Fernrohre, die in die Richtung der Pendel
t wurden, bestimmte Maskelyne diesen Winkel, indem er den Abstand der beiden
maß, auf welche die Fernrohre gerichtet waren. Die Differenz dieses Winkels und
ogenabstandes der beiden Standpunkte gab die Ablenkung der Pendel an. Zieht man
on dem Drehpunkte eines Pendels eine Linie nach dem Mittelpunkte der Erde, und
gert das Pendel bis an die Erdoberfläche, so ist der Abstand der Fußpunkte dieser beiden
auf der Erdoberfläche ebenfalls ein Maß für die Ablenkung durch den Berg, während
zweiten Linie die Wirkung der Erde dargestellt ist; man kennt sonach das Verhältniß
den Wirkungen. Die eine Wirkung wurde durch das Gewicht des Berges hervor-
t, das man wegen dessen regelmäßiger Form, und soviel sich beurtheilen ließ, gleich-
r Dichte berechnen konnte; aus diesem Gewichte ließ sich sodann die Ursache der an-
Wirkung, das Erdgewicht berechnen. Es ergab sich 4,74, während James aus Arbeiten
rthur Seat (1865) die Zahl 5,2 erhielt. Diese Resultate sind weniger zuverlässig,
an das Innere des Berges nicht genau kennt. — 3. Diese Methode beruht darauf,
Länge des Secundenpendels an verschiedenen Orten der Anz. prop. ist, und daß
nz. der Masse direct und dem Quadrat der Entf. umgekehrt prop. ist. Ist das Vol.,
chte, der Radius der Erde = V, D, R, dagegen für einen Berg das Vol. v, die
d, die Entf. des Schwerpunktes vom Gipfel = r, die Pendellänge auf der Erdober-
= l, die auf dem Berggipfel nöthige Verlängerung = λ, so ist $\lambda : l = (dv/r^2):(DV/R^2)$,
$D = dvlR^2/V\lambda r^2$, wonach D zu berechnen ist. Carlini verglich (1824) die Pendel-
auf dem Mont-Cenis mit derjenigen in Bordeaux und fand D = 4,4. Airy ließ sein
(1854) auf der Erdoberfläche und auf dem Boden eines 400^m tiefen Schachtes schwingen
nd D = 6,57. — Die Ungleichheiten rühren von der verschiedenen Dichte der Erde
schiedenen Orten her, die auf das Pendel wirken; über großen Eisenlagern schwingt
endel schneller, über großen Weltmeeren langsamer. Die Verschiedenheit der Dichte
Oberfläche und im Inneren erklärt auch, daß Newton die Abplattung aus theore-
Rechnungen größer fand als sie ist; er nahm die Gesammtdichte der Erde = derjenigen
erflächenschichten, wodurch die anziehende Wirkung der inneren Massen kleiner und
h die Wirkung der Schwungkraft der äußeren Massen verhältnißmäßig größer wurde.
4. Große Erwartungen hinsichtlich des Nachweises astronomischer Eigenschaften und
auen Lösung astronomischer und terrestrischer Größenfragen hegt man von dem Ho-
lpendel, das schon vor fast 50 Jahren von Hengler in München erfunden und unter
amen Pendelwage zu Demonstrationen der physischen Astronomie benutzt worden,
ganz verschollen war, aber von Zöllner neu erfunden, vervollkommnet und zu zahl-
Anwendungen geeignet erklärt wurde. Man denke sich eine Stange nicht weit von
einen Ende an einem Faden aufgehängt; dann wird ihr längerer Theil herabhängen.
gt man nun im Endpunkte des kürzeren Theiles an dessen unterer Seite einen
Faden, so kann man mittels desselben den kürzeren Theil herab und den längeren

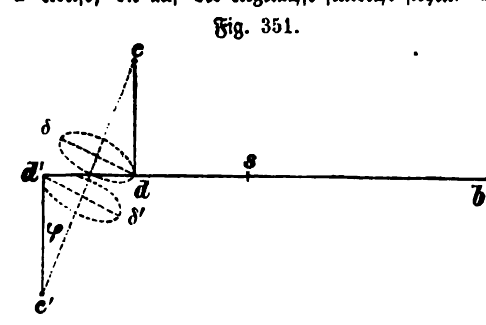
hinauf ziehen, so lange bis der Hebel wagrecht hängt. Wird sodann dieser zweite Faden an einem tiefer liegenden Punkte angehängt, so hat man das Horizontalpendel (Fig. 350 und 351). Sind die beiden Aufhängepunkte c und c′ in einer Lothrechten (Fig. 350), so dreht sich das Pendel, wenn man es bei b faßt und immer voranzieht, in einer hor. Kreisebene um die Achse cc′; denn jeder der beiden schiefen Fäden cd und c′d′ behält seine Länge und dreht sich um die Achse cc′, beschreibt also einen Kegelmantel; daher beschreiben die Befestigungspunkte d und d′ auf der Achse senkrechte, d. i. wagrechte Kreisebenen, also auch alle Punkte von dd′ oder von d′db; folglich wird der Schwerpunkt s des Hebels weder gehoben, noch gesenkt, der Hebel bleibt in jeder Lage, abgesehen von der Torsion, in Ruhe, er ist in indifferentem Gleichgewichte, wie jede Drehwage.

Fig. 350.



Er kann daher auch wie jede Drehwage durch die geringste Kraft aus seiner Lage gebracht werden; jedoch unterscheidet er sich von der Drehwage vortheilhaft darin, daß bei dieser die Wirkungen paralleler Kräfte z. B. der Anziehung des Mondes oder der Sonne, der el. oder magn. Kräfte der Erde u. s. w. sich gegenseitig aufheben, da sie auf beide Seiten dieses 2armigen Hebels gleich stark, aber entgegengesetzt drehend wirken, während das Horizontalpendel als einarmiger Hebel von solchen Kräften nur auf der einen Seite ergriffen wird und daher durch die geringste Kraft schon eine starke Veränderung erfährt; seine Empfindlichkeit ist, abgesehen von der Torsion, unendlich groß. Indessen läßt es sich auch weniger empfindlich machen, und zwar einfach dadurch, daß wie in Fig. 351 die beiden Aufhängepunkte c und c′ nicht lothrecht über einander angebracht werden. Bei einer Drehung des Hebels d′db beschreiben auch hier die Fäden cd und c′d′ Kegelmäntel und ihre Endpunkte d und d′ Kreise, die auf der Kegelachse senkrecht stehen. Diese Kreise sind jedoch nicht wagrecht, weil die Achse nicht lothrecht ist. Nach einer halben Drehung z. B. ist d nach δ, seiner höchsten Lage gelangt und senkt sich bei weiterer Drehung wieder bis in die tiefste Lage d; ebenso hebt sich auch d schon, wenn der Hebel nur wenig aus seiner ursprünglichen Lage gebracht wird. Da aber der Schwerpunkt s des ganzen Pendels auf derselben Seite der Achse wie d liegt, so muß sich auch s bei jeder Drehung des Hebels aus seiner ursprünglichen Lage heben. Ein gehobener Schwerpunkt, der nicht unterstützt ist, fällt in die tiefste Lage

Fig. 351.



zurück; folglich kehrt das Pendel nach jeder Ablenkung vermöge der Schwere in die ursprüngliche Lage zurück, es ist in dieser Lage in stabilem Gleichgewichte. Die Rückkehr geschieht durch Schwingungen, wodurch die genauen Beobachtungs- und Rechnungsmethoden der Schwingungslehre hier Anwendung finden. Wegen der stabilen Gleichgewichtslage ist diese Einrichtung weniger empfindlich als das Pendel mit lothrechter Achse; jedoch kann seine Empfindlichkeit nach Belieben gesteigert werden, indem man die Achse cc′ beliebig der Lothrechten nähert; dadurch wird die Hebung des Schwerpunktes bei kleinen Ablenkungen und daher auch die Arbeit für diese Hebung beliebig klein, so daß dieselbe schon von kleinsten Kräften geleistet werden kann. Schärfer erhellt dies aus der Theorie des Horizontalpendels (Stoll 1876): Das ursprünglich in hor. Lage befindliche Pendel beschreibt bei einer ganzen Umdrehung den Mantel eines Rotationskegels, dessen Achse cc′ (Fig. 351) um den ∠ φ gegen die Lothrechte geneigt ist, sein Schwerpunkt s also einen Kreis, dessen Ebene ein auf der Rotationsachse cc′ senkrechter Schnitt des Kegels und um den ∠ φ gegen die Horizontalebene geneigt ist. In Fig. 352 sei dieser Kreis durch $s\sigma$ dargestellt, sein Mittelpunkt sei o′, seine Achse oo′, wobei o den Punkt bedeute, in welchem die Achse die durch s gehende Horizontalebene schneidet. Bei der Drehung des Pendels um den Horizontalwinkel α gelange s nach σ. Beschreibt man nun mit dem Halbmesser os in jener Horizontalebene den Bogen $s\sigma'$, der den ∠ α mißt, verbindet den Endpunkt σ' mit σ, so liegt, wenn α hinreichend klein genommen wird, σ nahezu senkrecht über σ', und es ist außerdem $o\sigma = o\sigma' = os = r$.

ıan ferner durch σσ' eine Ebene, die senkrecht auf os steht, so ist $\sigma\sigma' = ee' = e's \tan\varphi$. nun der Schwerpunkt aus der Lage σ in die Lage s zurückschwingt, so erlangt er :ine Geschw. v_1, die so groß ist, als ob er senkrecht im freien Falle durch σσ' herabn wäre, und die also gefunden wird durch die Formel $v_1{}^2 = 2g \cdot \sigma\sigma' = 2g \cdot e's \tan\varphi$. man einem gewöhnlichen Verticalpendel von derselben Länge r die nämliche Elongaı, so erlangt sein Schwerpunkt in der tiefsten Lage eine Geschw. v, die durch die Fl. 2g . e's gefunden wird; daher entsteht die Prop. $v^2 : v_1{}^2 = g : g \tan\varphi$. Bei zwei ln von gleicher Länge aber, die aus gleicher Elongation durch verschiedene beschleu-e Kräfte g und g' zurückkehren, besteht nach derselben Fl. auch die Prop. $v^2 : v_1^2 = g : g'$, ıs sich ergibt, daß die beschleunigende Kraft des Horizontalpendels $g' = g \tan\varphi$. demnach der ∠ φ sehr klein ist, so ist auch die Kraft, welche das Pendel zurückführt, lein, und kann demnach das Pendel durch die geringste Kraft aus seiner Lage abgelenkt daher zum Nachweise kleinster Kräfte benutzt werden. Für die Schwingzeit gilt die el $t = \pi\sqrt{l/g \tan\varphi}$, woraus lich ist, daß das Horizontalpenei einem kleinen φ bedeutend ımer schwingt als ein Verticalı von gleicher Länge, wodurch enauigkeit der Beobachtung web gefördert wird. Wird φ größ 45°, so wird die Schwingeiner als beim Verticalpendel ann durch wachsendes φ zu ber Kleinheit herabgehen. Man sich leicht durch den Versuch ugen, daß bei sehr schiefer Lage Rotationsachse die Schw. des ontalpendels viel rascher als die ı.-P. geschehen; doch ist dies entlich, da dann die zurückführ Kraft in demselben Maße zut und daher keine Anwendung . Die Anwendung setzt ein ı φ voraus, da alsdann die ː Kraft schon zur Ablenkung icht; da das Pendel durch die erkraft zurückgeführt wird, so auch die geringste Aenderung ɔen sich schon in den Schw. des

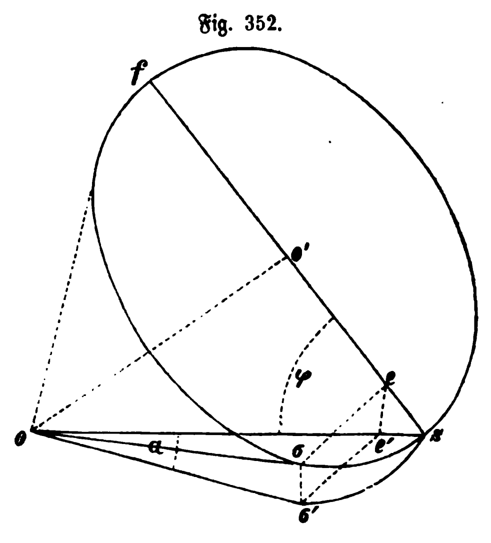


Fig. 352.

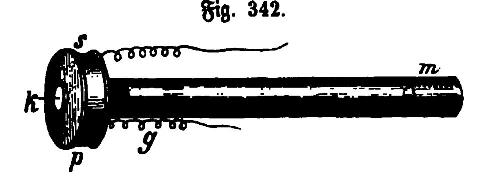
ls abspiegeln; daher ist es anwendbar zur Erkennung von Aenderungen der Schwere er Centrifugalkraft der Erde, zum Messen der Erddichte und der Erdbeben, zum Nachder Erdbewegungen. Dann ist es wegen seiner Empfindlichkeit und seiner einarmigen ıffenheit verwendbar, um die Verschiedenheit der Anziehung von Sonne oder Mond :sch. Entfernungen, sodann diese Entf. selbst und die Massen von Sonne und Mond timmen, ja man hofft sogar die Schnelligkeit der Fortpflanzung der Gravitation mitesselben auffinden zu können. Die große Empfindlichkeit, welche es für solche Messungen muß, ist allerdings auch eine Fehlerquelle, da es alsdann von allen Massenwirkungen sentlichen Lebens, von Luft, Wärme und Licht beeinflußt wird; so zeigte Zöllners Pendem Keller der Leipziger Sternwarte schon eine Ablenkung, als der Hörsaal sich füllte.

4. Die tägliche Bewegung, Achsendrehung oder Rotation der Erde (Aristarch 539 Samos 279 v. Chr., Copernicus 1543). Die Erde hat zwei Bewegungen, tägliche Drehung um sich selbst und eine jährliche drehende Bewegung um die ıe; die erstere nennt man auch Achsendrehung oder Rotation, die letztere Umlauf Revolution. Die Rotation besteht darin, daß alle Punkte der Erde in gleicher in einem Sterntage, vollständige Kreise beschreiben, mit Ausnahme der Punkte leinsten Durchmessers, den man deßhalb auch die Erdachse nennt. Die Erdachse so die gerade Verbindungslinie aller Punkte der Erde, welche bei der täglichen ung der Erde in Ruhe bleiben; die beiden Endpunkte der Achse auf der Oberheißen Pole, der auf der nördlichen Halbkugel liegende Pol der Nordpol, der :e Südpol. Die Achse enthält die Mittelpunkte aller von den Erdpunkten bebenen Kreise, deren Größe mit der Entfernung der Punkte von der Achse zu-

zwei Zifferblättern, welche Hundertel und Tausendtel von einer Sec, angeben, und welche durch einen Elektrom. außer Verbindung mit dem Uhrwerke gesetzt werden, sowie der Strom desselben geschlossen ist. Wird aber dieser Strom für kurze Zeit geöffnet, so gehen die Zeiger wieder, und aus ihrem Wege erkennt man die Zeit der Stromöffnung. Um z. B. die Fallzeit zu messen, geht der Draht zuerst um das Hufeisen der Uhr, dann zu einem Galgen an 2 Federn, zwischen denen die Fallkugel sitzt, und dann zur Kette zurück; von den beiden letzten Drahttheilen gehen indeß auch Zweige zu 2 Theilen eines Brettes unter dem Galgen, die 2 sich nahezu berührende Metallstreifen tragen. Der Strom ist in diesem Falle oben an der Kugel geschlossen, an dem Doppelbrette aber nicht; sowie aber die Kugel fällt, wird oben der Strom geöffnet und erst wieder geschlossen, wenn die Kugel auf das Brett schlägt und dadurch die Metallstreifen in Berührung bringt. Die Zeit der Stromöffnung, die an den Zifferblättern abgelesen wird, ist die Fallzeit. Eine Anwendung dieses Principes wird auch an den Phonautographen gemacht.

10. Das Telephon von Philipp Reis (1860) war ein interessanter Anfang zur Lösung der Aufgabe, Töne zu telegraphiren. Der Ton wird mittels eines Mundstückes in ein Holzkästchen geleitet, das oben durch eine Membran geschlossen ist, zu deren beiden Seiten die Poldrähte einer Batterie an Klemmen befestigt sind. An die eine Klemme geht von der Mitte der Membran ein dünnes Platinstreifchen, an die andere der eine Schenkel eines Metallwinkels, dessen Scheitel über der Membranmitte einen das Platinstreifchen beinahe berührenden Stift trägt. Da der Ton die Membran in Schw. versetzt, so wird durch jede hinreichend starke Schw. das Streifchen gehoben und mit dem Stifte in Berührung gebracht; sind also die Schw. stark genug, so entstehen so viele Stromunterbrechungen, als der Ton Schw. enthält. Nun ist in den einen Poldraht an entfernter Stelle auf einem Resonanzboden eine Spirale mit einem Metallstäbchen eingeschaltet; in diesem wird durch die Stromunterbrechung der Ton reproducirt.

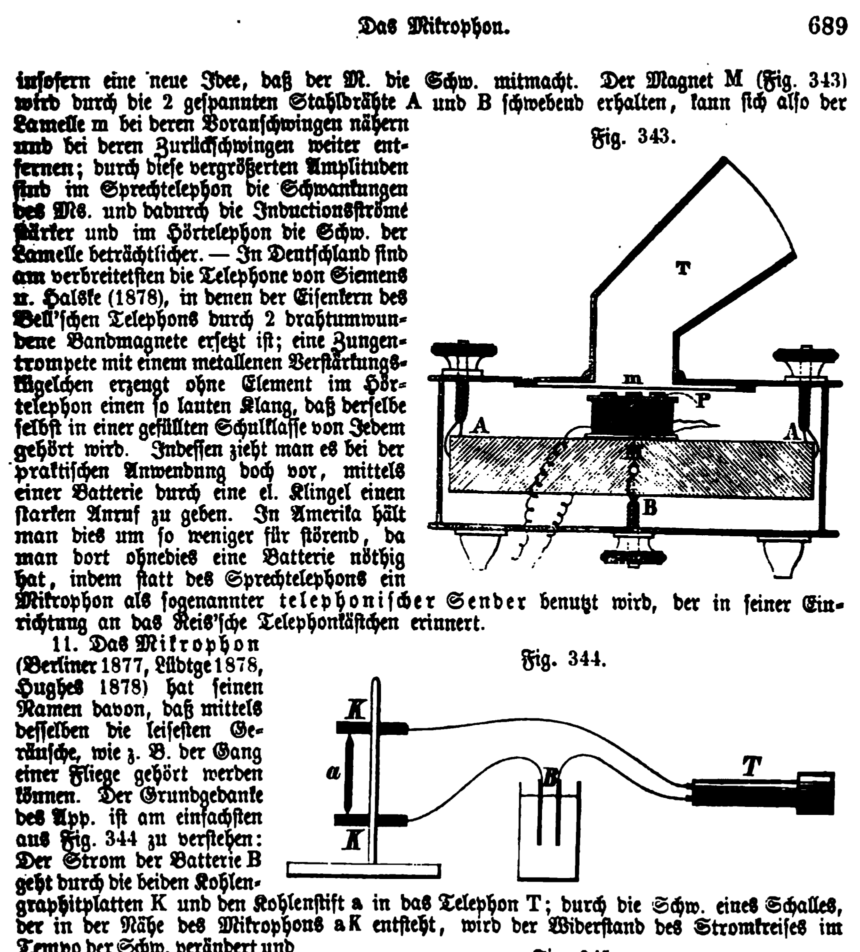
Fig. 342.



Das Telephon von Bell (1572—77) pflanzt nicht nur Töne, sondern auch die Sprache fort und zwar durch Inductionsströme, die von den Schallschw. hervorgerufen werden. Dasselbe besteht (Fig. 342) aus einem starken Stahlm. mg mit einer Fortsetzung k aus weichem Eisen, auf welcher eine Spule sp sitzt, die zahlreiche Windungen eines feinen mit Seide übersponnenen Kupferdrahtes enthält. Ganz nahe vor der Vorderfläche der Spule und des Eisenkerns k befindet sich das Hauptelement des Apparates, eine sehr dünne, sehr elastische kreisförmige Eisenplatte oder Eisenlamelle, das Diaphragma. Vor dieser Lamelle befindet sich der Holzdeckel des Apparates, der in der Mitte eine trichterförmige Oeffnung trägt, an welche man den Mund hält beim Sprechen und das Ohr beim Hören. Dieser Holzdeckel drückt die Eisenlamelle mit ihrem Rande gegen die ringförmige Stirnfläche einer weiten die Spule umgebenden Holzhülle, so daß ein großer kreisförmiger Theil der Lamelle frei bleibt. An diese weite, kurze Hülle schließt sich eine engere und längere Holzröhre, die den M. umschließt, und welche an ihrem hinteren Ende 2 Klemmschrauben trägt, mit welchen die 2 Drahtenden der Spule verbunden sind. Von den Klemmschrauben gehen zwei Leitungsdrähte auf die andere Station an die Klemmschrauben eines ganz gleichen Hörtelephons. Wird nun durch die Mundöffnung ein Schall in das Sprechtelephon geleitet, so geräth die Lamelle in Schw., nähert und entfernt sich von dem polartig starken Kerne der Spule, wodurch ihr Influenzms. abwechselnd verstärkt und geschwächt wird. In Folge dessen wird auch der Ms. des empfindlichen, weichen Eisenkernes in dem Tempo und gemäß der Stärke der Schw. abwechselnd verstärkt und geschwächt. Jede Schwankung des Ms. des Eisenkerns aber erzeugt in der Spule Inductionsströme, die an Stärke und Dauer gerade so wechseln wie die Schw. der Lamelle. Diese Inductionsstr. werden durch die Leitungsdrähte auf die andere Station in das Hörtelephon geführt, fließen dort durch die Spule in demselben Wechsel von Stärke und Dauer wie in dem Sprechtelephon und bringen daher in dem Kerne der Spule dieselben Schwankungen des Ms. hervor wie in dem Spulkerne des Sprechapparates. Deßhalb wird die Lamelle des Hörtelephons bald stärker, bald schwächer angezogen, geräth daher in dieselben Schw. wie die Lamelle des Sprechtelephons und bringt demnach auf das Ohr dieselben Wirkungen hervor. Wegen der zweimal stattfindenden Uebergänge von Wellenbewegungen, wegen der zweifachen Verwandlung von Ms. und El., sowie wegen des Leitungswiderstandes der Leitungsdrähte findet eine bedeutende Schwächung des Schalles statt. Trotz dieser Schwäche des reproducirten Schalles hat das Telephon eine kaum erwartete Ausdehnung gefunden. In zahlreichen verbesserten Constr. ist die Wirkung wesentlich verstärkt worden, obwohl weder neue Ideen Eingang gefunden haben, noch auch die objective Hörbarkeit erreicht ist. Am nächsten scheint derselben Böttchers Telephon (1881) zu kommen, da dessen deutliche Sprache 1m weit deutlich vernehmbar ist; es enthält auch

insofern eine neue Idee, daß der M. die Schw. mitmacht. Der Magnet M (Fig. 343) wird durch die 2 gespannten Stahldrähte A und B schwebend erhalten, kann sich also der Lamelle m bei deren Voranschwingen nähern und bei deren Zurückschwingen weiter entfernen; durch diese vergrößerten Amplituden sind im Sprechtelephon die Schwankungen des Ms. und dadurch die Inductionsströme stärker und im Hörtelephon die Schw. der Lamelle beträchtlicher. — In Deutschland sind am verbreitetsten die Telephone von Siemens u. Halske (1878), in denen der Eisenkern des Bell'schen Telephons durch 2 drahtumwundene Bandmagnete ersetzt ist; eine Zungentrompete mit einem metallenen Verstärkungskügelchen erzeugt ohne Element im Hörtelephon einen so lauten Klang, daß derselbe selbst in einer gefüllten Schulklasse von Jedem gehört wird. Indessen zieht man es bei der praktischen Anwendung doch vor, mittels einer Batterie durch eine el. Klingel einen starken Anruf zu geben. In Amerika hält man dies um so weniger für störend, da man dort ohnedies eine Batterie nöthig hat, indem statt des Sprechtelephons ein Mikrophon als sogenannter telephonischer Sender benutzt wird, der in seiner Einrichtung an das Reis'sche Telephonkästchen erinnert.

Fig. 343.



11. Das Mikrophon (Berliner 1877, Lüdtge 1878, Hughes 1878) hat seinen Namen davon, daß mittels desselben die leisesten Geräusche, wie z. B. der Gang einer Fliege gehört werden können. Der Grundgedanke des App. ist am einfachsten aus Fig. 344 zu verstehen: Der Strom der Batterie B geht durch die beiden Kohlengraphitplatten K und den Kohlenstift a in das Telephon T; durch die Schw. eines Schalles, der in der Nähe des Mikrophons aK entsteht, wird der Widerstand des Stromkreises im Tempo der Schw. verändert und dadurch auch die Stromstärke und die magnetische Wirkung auf das Telephon in demselben Tempo vergrößert oder verkleinert, womit die starke Schallwirkung des Telephons erklärlich ist. Ein Mikrophon ist also ein leitender, am besten ein poröser Körper, der lose, aber in völligem Schlusse in eine Stromleitung eingeschaltet ist; es soll den Strom nicht, wie im Reis'schen Telephon unterbrechen, sondern nur seinen Widerstand im Tempo der Schw. verändern. Hieraus ist ersichtlich, daß es zahllose Mikrophoneinrichtungen geben kann. Wie man mit der eben beschriebenen den Gang einer Fliege hören kann, ist in Fig. 345 dargestellt, wo c und c' die 2 Kohlenplatten, A den Stift, B ein Resonanzbrettchen und H die Unterlage des App. bezeichnet. Ein Mikrophon, das zum Hören

Fig. 344.

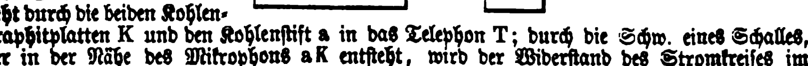
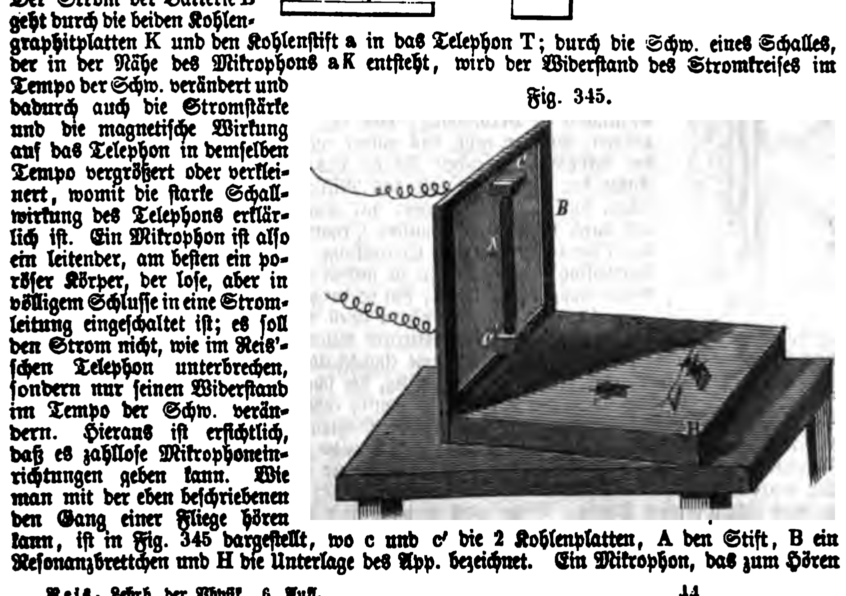
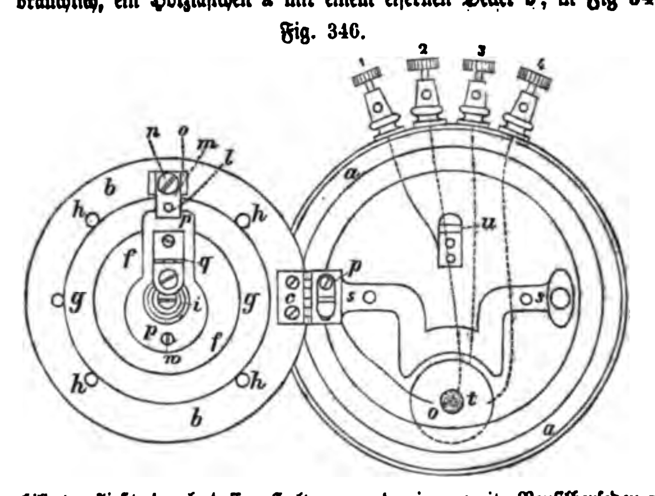


Fig. 345.



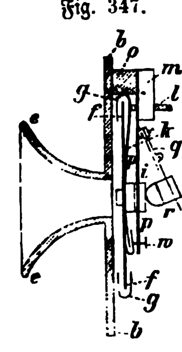
feinster Geräusche eingestellt ist, gibt mit der gewöhnlichen Sprache ein knackendes Geknatter, in welchem die Sprache völlig verschwindet; für diesen Zweck muß der Druck an der Contactstelle, wo der lose Leiter eingeschaltet ist, verändert und zwar hier verstärkt werden, damit die Schwingung weniger stark und die Stromverbindung inniger sei. Dieses Einstellen oder Adjustiren des Contactes bildet die Schwierigkeit des Mikrophons und macht es für Ungeübte weniger leicht nutzbar als das Telephon für sich allein. Trotzdem hat das Mikrophon als telephonischer Sender oder Transmitter vielfach Aufnahme gefunden: auf jeder Station ist ein Telephon und ein Transmitter, gegen den Transmitter spricht man, mit dem Telephon hört man. In Amerika ist besonders Berliners Transmitter gebräuchlich, ein Holzkästchen a mit einem eisernen Deckel b; in Fig 346 ist das Kästchen geöffnet dargestellt, der Deckel b um das Charnier c umgeschlagen, während Fig. 347 einen Durchschnitt des Deckels zeigt. Der Strom eines Leclanché-Elementes geht durch die Klemme 1 zu der Feder u, die bei geschlossenem Deckel die Schraube l des Deckels berührt, geht durch diese Schraube und die Neusilberfeder k auf das Graphitblättchen i, das auf der Eisenlamelle f des Mundstücks e befestigt ist und mit dem abgerundeten, gelenkig aufgehängten Graphitcylinder r den Contact

Fig. 346.



bildet, fließt durch dessen Halter q und eine zweite Neusilberfeder p auf den Deckel und durch dessen Charnier c und einen von hier ausgehenden Draht s o auf die Hauptspule des Inductors t, und geht dann durch den punktirten Draht auf die Klemme 2, wo der andere Poldraht des Leclanché eingeschraubt ist. Durch das Sprechen in das Mundstück e geräth die von dem Gummiring g gehaltene Lamelle f in Schw. und mit ihr das Graphitblättchen i, so daß hier in dem Contact mit dem Graphitcyl. r die Stromschwankungen im Tempo der Schw. erzeugt werden. Hierdurch entstehen in der Inductionsspule des Inductors t die Inductionsströme, die das Telephoniren bewirken; das eine Drahtende dieser Spule steht mit der Klemme 3 in Verbindung, von der die Liniendrahtleitung nach der anderen Station geht, das andere mit der Klemme 4, in deren nach der Erdplatte gehenden Draht das Telephon eingeschaltet ist. — Außer der Telephonie soll das Mikrophon noch Anwendung ermöglichen, um Harthörigen oder gar Tauben das Hören zu erleichtern; um durch Geräusche erkrankter Organe im Innern des Menschen oder der Thiere die Art der Erkrankung zu erkennen, ähnlich wie das Stethoskop; um Erdbeben zu messen oder aufzuzeichnen, als Seismometer oder Seismograph; um verborgene Quellen zu entdecken u. s. w.

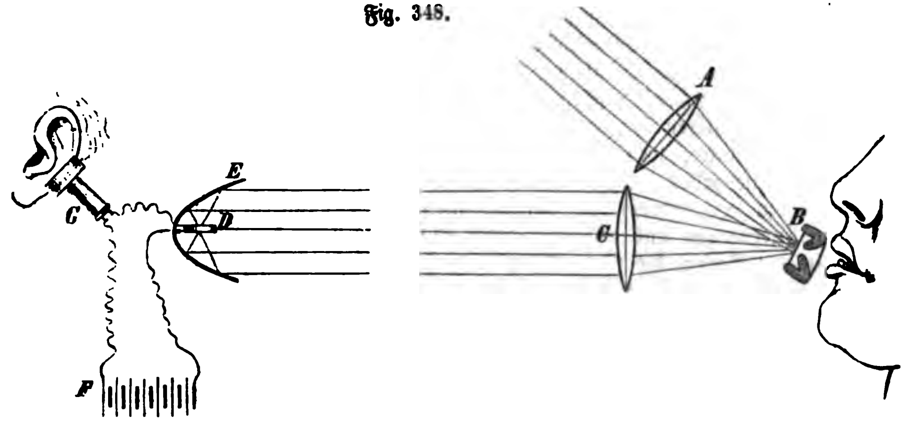
Fig. 347.



12. Das Photophon (Bell u. Tainter 1880) ist ein Apparat zur Fortpflanzung des Schalles durch intermittirende Belichtung einer Selenzelle, die mit einem Telephon in den Stromkreis einer Batterie eingeschaltet ist. Die Photophonie beruht also auf der Leitungsfähigkeit des krystallinischen Se, die schon Hittorf (1852) entdeckt hatte, und welche nach der Entdeckung von Willoughby Smith (oder eigentlich seines Gehilfen May 1873) durch Belichtung bedeutend vergrößert wird. Während die Selenbarren Smiths einen Widerstand von 1400 Megaohms hatten, gelang es Tainter, Selenzellen anzufertigen, deren Widerstand im Dunkeln nur 300 Ohms und im Licht nur halb soviel betrug. Die Selenzellen wurden anfänglich nach Siemens' Methode hergestellt; auf ein Glimmerblättchen wurden feine zickzackförmige Platin-, Eisen- oder Kupferdrähte gelegt, auf diese ein Tropfen geschmolzenes Se geträufelt und darauf ein zweites Glimmerblättchen gedrückt, wodurch das Se den Raum zwischen den Drähten erfüllte. Diese Zelle wurde nun in einem Paraffinbade einige Stunden auf 210° erhitzt und dann sehr langsam abgekühlt; sie hatte aber dann noch

Bell immer noch wenigstens 1/4 Megaohm Widerstand. Tainter erkannte später das chemisch auf das Se wirkende Messing als viel vortheilhafter, strich über die erhitzte Messingdrahtzelle mit einer Selenstange hin und erhitzte den entstehenden glasigen Ueberzug, bis er anfing zu schmelzen und danach metallisch, krystallinisch und granulirt erschien, nur noch den genannten kleinen Widerstand und hohe Lichtempfindlichkeit besaß. Eine solche Selenzelle D wird nun in dem Brennpunkte eines parabolischen Hohlspiegels E (Fig. 348) in den Stromkreis einer Batterie F eingeschaltet, der an der Hörstelle ein Telephon G enthält. In einer Entf., die

Fig. 348.



bis auf 200 m steigen kann, befindet sich der Sprechapparat, ein Mundstück, das mit einem Spiegel von versilbertem Glimmer oder Mikroskopglas geschlossen ist. Auf diesen fällt durch eine Linse A concentrirtes Licht, das nach seiner Reflexion von dem Spiegel durch eine zweite Linse C in parallele Strahlen verwandelt wird. Da nun der dünne Spiegel durch den Schall in Schw. versetzt wird, so undulirt das reflectirte Strahlenbündel hin und her, trifft und verläßt im Rythmus der Schallschw, die Selenzelle, wodurch diese in demselben Tempo leitend und wieder nicht leitend wird und demnach in demselben Rythmus Stromstöße durch das Telephon sendet, die den Schall reproduciren.

Zehnte Abtheilung.

Die Physik des Himmels (Astronomie).

1. Die Erde als Weltkörper.

Die Physik des Himmels betrachtet die Bewegungen und Eigenschaften der Welt- oder Himmelskörper. Unter Himmelskörpern versteht man Sonne, Mond und Sterne. Die Sterne kann man eintheilen in Fixsterne, Planeten, Kometen und Sternschnuppen. Der gewöhnliche Sprachgebrauch bezeichnet nur Fixsterne und Planeten mit dem Ausdruck Sterne, da nur diese beiden Gattungen als leuchtende und strahlende Himmelspunkte erscheinen, während die Kometen als größere oder kleinere Lichtwolken, manchmal mit einem sternartigen Kerne, und die Sternschnuppen als plötzlich aufblitzende, rasch hinschießende und verschwindende Himmelsfunken auftreten. Fixsterne und Planeten sind für das gewöhnliche, natürliche Sehen nur darin verschieden, daß die Fixsterne zitterndes, die Planeten aber ruhiges Licht besitzen; bei längerer Beobachtung zeigt sich noch darin ein Unterschied, daß die Fixsterne ihre gegenseitige Stellung nicht merklich ändern, während die Planeten zwischen den Fixsternen hin- und herwandeln, ein Unterschied, von dem die Namen herrühren (πλανάομαι, herumschweifen). Da die Bewegungen der Weltkörper von der Erde aus beobachtet und gemessen werden, so müssen wir zuerst die Gestalt, Größe und Bewegung der Erde ins Auge fassen. 536

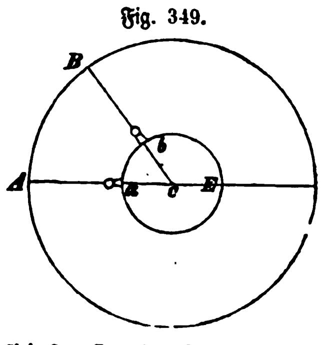
1. **Die Gestalt der Erde** (Pythagoras 540 v. Chr., Eudoxus 350 v. Chr., Aristoteles 384—322 v. Chr.). Die Erde ist eine frei im Weltraume schwebende Kugel. Daß sie frei im Weltraume schwebt, folgt daraus, daß wir an keiner Stelle eine materielle Verbindung mit einem anderen Weltkörper, sondern überall den freien Weltraum über uns wahrnehmen. Als Beweise für die Kugelgestalt werden gewöhnlich angeführt: 1. Der Horizont, d. i. der Theil der Erde, den wir überblicken können, hat überall eine kreisförmige Gestalt und einen viel kleineren Durchmesser, als er bei ebener Erdoberfläche haben müßte. 2. Der Horizont erweitert sich bei Erhöhung des Standpunktes. 3. Hohe Gegenstände, die aus großer Entfernung uns näher kommen, erscheinen zuerst mit ihrer Spitze und treten erst allmälig mit ihren unteren Theilen hinter dem Horizont hervor; die umgekehrte Erscheinung zeigen sie, wenn sie sich allmälig von uns entfernen. 4. Sonne, Mond und Sterne gehen an Orten, die in ostwestlicher Richtung eine verschiedene Lage haben, zu verschiedener Zeit auf und unter. 5. Bei raschem Reisen tauchen immer neue Sterne vor uns auf und sinken hinter uns unter den Horizont. 6. Bei den vielfachen Reisen, die nach allen Richtungen auf der Erde unternommen wurden, hat man niemals schroffe, sondern immer allmälige Veränderungen der Erdoberfläche im großen Ganzen wahrgenommen, und gelangt beim Einhalten derselben Richtung nach derselben Gegend zurück. 7. Bei den Mondfinsternissen hat der auf den Mond fallende Erdschatten immer eine kreisförmige Begrenzung. 8. Sonne, Mond und Planeten haben Kugelgestalt. 9. Jede unabhängige Flüssigkeit nimmt Kugelgestalt an, und man hat Gründe zu der Annahme, daß die Erde einst flüssig war.

Bei Homer ist die Erde eine ruhende Scheibe, vom Okeanos umströmt; Thales (650 v. Chr.) hielt sie für eine auf Wasser schwimmende Scheibe, Anaximander (550 v. Chr.) für einen schwimmenden Cylinder. Pythagoras, Eudoxus und Aristoteles erklärten sie für eine Kugel. Ad 1 und 2. Wäre die Erdoberfläche eine Ebene, so würde der Horizont sich viel weiter als $\frac{1}{2}$ M. erstrecken, während ein auf freiem, ebenem Felde stehender Beobachter nur diese Entf. ringsum durchblickt; außerdem würde eine Erhöhung des Standpunktes den Hor. nicht vergrößern. Wäre die Erdgestalt sehr von der Kugelgestalt verschieden, so müßte der Hor. nach verschiedenen Richtungen eine verschiedene Größe haben. Nur bei der Kugel ist er überall kreisförmig; denn der Hor. wird von den ins Auge gelangenden Lichtstrahlen begrenzt, welche an die Erde ringsum tangiren, und nur bei der Kugel bilden die von jedem äußeren Punkte an den Körper gezogenen Tangenten durch ihre Berührungspunkte einen Kreis. Eine Tangente ist nach einem bekannten geom. Satze die mittlere geometrische Proportionale zwischen der Höhe des Beobachters und der Summe dieser Höhe und des Erddurchmessers; kennt man also den Erddurchmesser, so kann man auch für jede Beobachtungshöhe die Weite des Hor. berechnen, und findet dieselbe, abgesehen von den durch die Refraction entstehenden Abweichungen, der Beobachtung entsprechend. Ad 3. Wäre die Erde eine Scheibe, so müßte ein auf derselben näher kommender Gegenstand, z. B. ein Schiff, ein Inselberg, wie der Pic von Teneriffa sofort ganz sichtbar sein; das allmälige Hervortreten, zuerst der Spitze, dann mittlerer Theile und endlich erst des Fußes spricht für die Krümmung der Erde. Auf einer Scheibe dürfte ein Gegenstand erst verschwinden, wenn (342.) sein Gesichtswinkel $\frac{1}{2}'$ klein wäre, der Pic von Teneriffa also in 900 M. Entf., während er selbst mit den besten Fernrohren in 30 M. Entf. nicht mehr sichtbar ist. Ad 4. Wäre die Erde eine Ebene, so müßten die Himmelskörper für alle Erdbewohner gleichzeitig über den Hor. treten, und gleichzeitig hinter demselben verschwinden, nachdem sie ihre ostwestliche Bahn oberhalb des Hor. beendigt hätten. Nun gehen aber für alle Erdbewohner, die in ostwestlicher Richtung gleich weit von einander entfernt sind, die Sonne und die übrigen Gestirne gleich viel später auf und unter, was nur möglich ist, wenn die Erde Kugelgestalt hat. Ad 5. Reist man in nordsüdlicher Richtung, so erheben sich nach gleichen zurückgelegten Wegen immer gleiche, durch neue Sterne bezeichnete und erkennbare Himmelsräume vor uns aus dem Hor. und verschwinden hinter uns unter dem Hor.; dies ist nur möglich, wenn die Erde nordsüdlich eine kreisförmige Krümmung hat. Die Abweichungen von dieser nicht ganz genau geltenden Regel werden wir sogleich näher betrachten. Bei Reisen in anderen Richtungen treten dieselben Erscheinungen ein, wenn man die ostwestliche Bewegung des Himmels abrechnet; folglich hat die Erde nach allen Seiten kreisförmige Krümmungen. Ad 6. Die schroffen Abstürze oder sanften Abhänge, die man in Gebirgen auf Reisen trifft, bilden keine Abweichung von der Kugelgestalt; sie sind gegen die Größe der Erde gehalten

sehr klein. Die erste Umschiffung der Erde geschah durch Ferdinand Magelhaen (1519—22); seitdem geschahen noch viele Reisen um die Welt nach vielerlei Richtungen; immer gelangte man in entgegengesetzter Richtung an den Ort zurück, von dem man ausgegangen war. Ad 7. Auch andere Körper, wie Cylinder, Kegel können einen kreisförmigen Schatten werfen, aber nur in einzelnen ganz bestimmten Stellungen; der bei Mondfinsternissen auf den Mond fallende Erdschatten ist aber immer kreisförmig; einen kreisförmigen Schatten in allen Stellungen gibt nur die Kugel. Ad 8. Die Erde ist ein verhältnißmäßig kleiner Weltkörper; die Sonne, Jupiter und Saturn sind größer und haben Kugelgestalt; Venus und Merkur sind näher bei der Sonne und besitzen dieselbe Form; der Mars hat ungefähr dieselben Verhältnisse wie die Erde und ebenfalls Kugelgestalt; auch der Mond und die Satelliten des Jupiter stimmen in der Form mit den genannten Körpern überein. Wenn es nun auch sehr kleine von der Kugelform abweichende Weltkörper, die Sternschnuppen, und sehr große ganz abnorme Erscheinungen, wie die Kometen, von den seltsamsten Gestalten gibt, so ist doch die Kugelform bei den der Erde ähnlichen Weltkörpern so verbreitet, daß dieselbe auch für die Erde vermuthet werden muß. Ad 9. Die Geologen nehmen meist an, daß die Erde jetzt noch im Inneren feurigflüssig sei, und führen als Gründe für diese Hypothese an: die Zunahme der Erdwärme um 1° für je 30m Entf. von der Oberfläche nach innen, die warmen Quellen, die Vulkane, die Erdbeben u. s. w. Ist die Erde jetzt noch im Innern feurigflüssig, so war sie einstens ganz flüssig und mußte dann, wie jede unabhängige flüssige Masse, Tropfen, Plateaus Kugel u. s. w. Kugelgestalt annehmen.

Da nach allen Richtungen über dem Horizont bei Nacht Himmelskörper wahrgenommen werden, deren Entfernungen von uns wir wegen der Größe derselben nicht abschätzen können und deßwegen für sehr groß und einander gleich halten, so erscheint uns der Himmel über dem Horizont als eine Halbkugel, und da für den Himmelsraum unter dem Horizont Gleiches gilt, so gewöhnen wir uns, den Himmel als eine um die Erde gespannte Hohlkugel anzusehen, deren Mittelpunkt mit dem der Erdkugel zusammenfällt. Himmel und Erde sind also concentrische Kugelflächen. Den Himmelspunkt über unserem Haupte, also den Endpunkt der Verlängerung unseres Erdradius bis an die Himmelskugel über uns, nennen wir Scheitelpunkt oder Zenit, den Endpunkt der Verlängerung bis an die Himmelsfläche unter uns dagegen Fußpunkt oder Nadir. Ginge man genau in einem Kreise um die Erde, so würden alle Scheitelpunkte genau einen concentrischen Himmelskreis bilden; nach dem Zurücklegen eines Halbkreises, eines Quadranten, eines Grades auf der Erde hätte auch der Zenit die Hälfte, einen Quadranten, einen Grad des Himmelskreises zurückgelegt, vorausgesetzt, daß die Erde eine vollkommene Kugel ist; die Scheitelpunkte A und B zweier Erdorte a und b (Fig. 349) sind am Himmel ebenso viele Bogengrade von einander entfernt als die Erdorte; man findet daher die Gradentfernung zweier Erdpunkte von einander, indem man die Grade des Bogens eines durch ihre beiden Zenite gehenden größten Himmelskreises mit dem Theodolit mißt.

Fig. 349.



Die Gestalt der Erde ist nicht eine vollkommene Kugel, sondern an zwei diametralen Stellen abgeplattet; die Abplattung beträgt nach Bessel 1/299, d. h. der kleinste Durchmesser ist um 1/299 kleiner als der größte. Legt man in der Richtung des kleinsten Durchmessers Schnittebenen durch die Erde, so erscheinen dieselben als nach beiden Enden dieses Durchmessers hin schwächer gekrümmte, kreisähnliche Ellipsen. Dreht man eine Ellipse um den kleinsten Durchmesser, so entsteht ein Körper, den man Sphäroid nennt, und dessen Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser Kreise sind. Sind diese Schnitte bei der Erde auch Kreise, so ist die Erde ein sehr kugelförmiges Sphäroid. Die Abplattung wurde aufgefunden und bestimmt durch Gradmessungen; man fand, daß ein Grad eines durch den kleinsten Durchmesser gedachten Kreises in Lappland = 57437 Toisen, in Peru = 56753 Toisen, daß also

der Grad nach Norden zu größer wird. Nachgewiesen wurde sie durch Pendelversuche: ein und dasselbe Pendel macht nach Norden zu immer mehr Schwingungen in derselben Zeit, und umgekehrt muß das Secundenpendel nach Norden zu länger gemacht werden (140.). Hieraus folgt, daß die Schwere nach Norden zu wächst, was sich nur durch Mitwirkung der Abplattung erklärt. Die Abplattung erklärt man durch die Wirkung der Centrifugalkraft im feurigflüssigen Zustande der Erde (Plateaus Versuch, die Kugel aus Blechringen auf der Schwungmaschine (141. und 152.) eine Thonkugel auf einer Drehscheibe). Die genauere Untersuchung der Resultate älterer und neuerer Gradmessungen haben zu der Vermuthung geführt, daß die Abplattung an verschiedenen gleichweit nördlich gelegenen Orten nicht dieselbe ist, und daß die Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser ebenfalls nicht genau Kreise sind, daß also das Sphäroid nicht genau die Gestalt der Erde wiedergibt, daß die Erde in westöstlicher Richtung ebenfalls eine Art von Abplattung besitzt; zur genaueren Entscheidung über diese Vermuthung hat General Baeyer eine neue westöstliche Messung einer Länge von Irland bis zur Ostgrenze von Europa veranlaßt.

Die Abplattung wurde zuerst von Newton aus dem flüssigen Urzustande der Erde geschlossen und unter der Annahme, daß die Erde überall gleiche Dichtigkeit besitze, — $^1/_{230}$ berechnet. Durch Richers Reise von Paris nach Cayenne und zurück (1672) erhielt Newtons Schluß die erste Bestätigung. Richer fand nämlich, daß eine von Paris mitgenommene Uhr in Cayenne täglich 148 Sec. nachging, und für Cayenne regulirt, nach der Rückkehr nach Paris 148 Sec. vorging. Die hierin ausgesprochene Verminderung der Schwerkraft rührt aber nicht blos von der Abplattung, sondern auch von der Centrifugalkraft der Erde (73.) her. Die Centrifugalkraft allein vermindert die Schwere am Aequator um $^1/_{289}$; der an der Verminderung, welche bekanntlich $^1/_{200}$ beträgt, fehlende Betrag rührt von der Abplattung her. Berechnet man die Größe der Schwerkraft mit Berücksichtigung der Abplattung und der Centrifugalkraft an verschiedenen Orten der Erde, und bestimmt dieselbe dann mittels Pendelversuchen experimentell, so erhält man dieselben Resultate, worin eine Bestätigung der Abplattung und ihrer angegebenen Größe liegt. Die erste genauere Bestimmung wurde mit der ersten genauen Messung verschiedener Grade möglich; die peruanische Gradmessung geschah 1735 durch Bouguer, Condamine und Godin, die lappländische 1736 durch Maupertuis, Clairaut und Outhier. Aus diesen Messungen berechnete Bessel die Zahl $^1/_{299}$. Mit Berücksichtigung neuerer Gradmessungen findet James $^1/_{294}$, während Sabines (1823) Pendelversuche im hohen Norden $^1/_{289}$ ergeben.

537 **2. Die Größe der Erde** (Eratosthenes 200 v. Chr., Bessel 1837). Aus der Länge eines Grades einer Kugel kann man durch Multiplication mit 360 die Länge des Umfanges eines größten Kreises und hieraus durch Division mit 2π den Halbmesser berechnen. Verwickelter wird die Methode bei einem Sphäroid. Bessel hat aus den 10 besten Gradmessungen, die 50° 34′ umfassen, den größten und den kleinsten Halbmesser berechnet und den ersten = 859,4367 M., den letzten = 856,5637 M., die Abplattung = 1 : 299,1528 gefunden. Der größte Durchmesser der Erde ist demnach 1719, der kleinste 1713 M.

Schon Eratosthenes hatte den Erdumfang zu 250 000 Stadien bestimmt; er beobachtete, daß zu Syene die Sonne zur Zeit des höchsten Sommers gerade im Zenit stand, während sie zu Alexandrien zu derselben Zeit 7½° vom Zenit entfernt war. Hieraus schloß er, daß die beiden Orte 7½° von einander entfernt seien, und da diese Entf. 5000 Stadien betrug, so konnte er die Länge von 1° berechnen. Im 9. Jahrh. ließ der Kalif Al-Mamun einen Bogen von 20° mit Stäben sorgfältig messen. Ferrel maß 1525 die Strecke von Paris bis Amiens durch die Zahl der Umdrehungen seiner Wagenräder, und fand so 1° = 57 070 Toisen. Genauer wurden die Messungen erst, als Snellius die Methode der Triangulation einführte, nach welcher die zu messende Strecke in ein Netz von Dreiecken gefaßt wird, von denen nur eine Seite, die Basis der ganzen Messung, mit größter Genauigkeit gemessen, die übrigen aber mittels der Basis und der ebenfalls durch die genauen Winkelinstrumente sehr genau auffindbaren Winkel berechnet werden. — Nach den Bessel'schen Zahlen ist die Oberfläche der Erde = 9 279 848, also beinahe = 10 M. Quadratmeilen und der Inhalt der Erde = 2650 Mill. Kubikmeilen. Wäre die Erde von Wasser, so würde sie 1 082 647 Trillionen, etwas mehr als 1 Quadrillion kg wiegen.

3. Die Dichte der Erde liegt nach zahlreichen Beobachtungen zwischen 5 und 7, d. h. die Erde wiegt 5—7mal soviel, als wenn sie von Wasser wäre, also 5—7

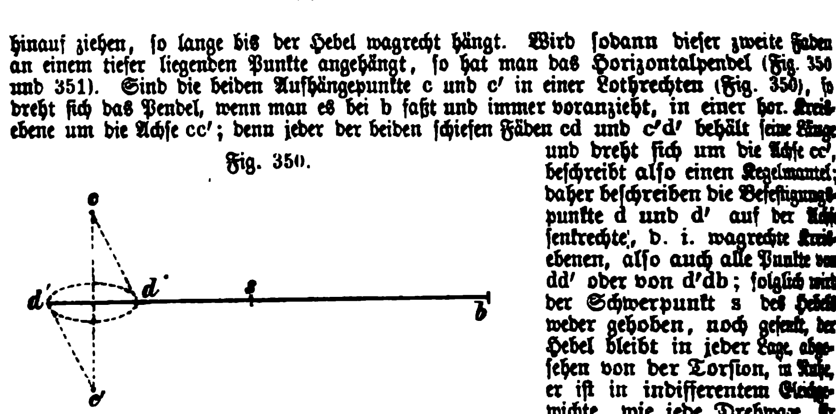
Quadrillionen kg. Da die Oberflächenschichten nur eine Dichte von 2—3 haben, so muß das Innere der Erde dichter sein. Die Methoden zur Bestimmung der Dichte sind folgende: 1. Die Drehwage oder das wagrechte Pendel unter dem Einflusse der Anziehung sehr großer Gewichte. 2. Die Ablenkung eines Pendels durch einen Berg von bekannter Masse. 3. Die Vergleichung der Pendelschwingungen auf der Erdoberfläche mit solchen auf der Spitze eines Berges oder in der Tiefe eines Schachtes. 4. Das Horizontalpendel von Zöllner (1869) oder die Pendelwage von Lorenz Hengler (1832).

1. Die Methode der Drehwage von John Mitchell (1759) wurde zuerst von Cavendish (1797) angewendet; an einem stark construirten zweiarmigen Hebel befanden sich beiderseits Gewichte von mehr als 3 Ctr., zwischen denen an einem feinen Silberfaden ein leichter Hebel mit 2 kleinen Metallkugeln an den Enden schwebte. Die großen Kugeln wurden in eine solche Lage gebracht, daß die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte nicht senkrecht auf dem freien Hebel stand; dann wurden die kleinen Kugeln angezogen und so der kleine Hebel gedreht, wodurch derselbe durch Mitwirkung der Torsion in Schwingungen gerieth, die aus größerer Entf. durch ein Fernrohr beobachtet wurden. Aus der Vergleichung dieser Schwingungszahl und der dieselbe erzeugenden Gewichte mit der Schwz. eines gewöhnlichen Pendels konnte man das Gewicht der Erde berechnen, und Cavendish fand so die Erddichte = 5,45. Dieselbe Methode, vervollkommnet und mit Berücksichtigung aller Fehlerquellen, schlug Reich (1838) ein und fand 5,44, während Bailys (1842) zahlreiche Versuche die etwas größere Zahl 5,56 ergaben. — 2. Maskelyne und Hutton (1772) hängten zu beiden Seiten des Berges Shehallian in Pertshire an Punkten, deren linearer und Bogenabstand genau gemessen war, Pendel auf. Durch den Berg wurden die Pendel etwas aus ihrer Lage seitwärts nach dem Berge zu abgelenkt, machten also einen größeren Winkel mit einander als den Bogenabstand der beiden Punkte. Durch Fernrohre, die in die Richtung der Pendel gebracht wurden, bestimmte Maskelyne diesen Winkel, indem er den Abstand der beiden Sterne maß, auf welche die Fernrohre gerichtet waren. Die Differenz dieses Winkels und des Bogenabstandes der beiden Standpunkte gab die Ablenkung der Pendel an. Zieht man nun von dem Drehpunkte eines Pendels eine Linie nach dem Mittelpunkte der Erde, und verlängert das Pendel bis an die Erdoberfläche, so ist der Abstand der Fußpunkte dieser beiden Linien auf der Erdoberfläche ebenfalls ein Maß für die Ablenkung durch den Berg, während in der zweiten Linie die Wirkung der Erde dargestellt ist; man kennt sonach das Verhältniß der beiden Wirkungen. Die eine Wirkung wurde durch das Gewicht des Berges hervorgebracht, das man wegen dessen regelmäßiger Form, und soviel sich beurtheilen ließ, gleichmäßiger Dichte berechnen konnte; aus diesem Gewichte ließ sich sodann die Ursache der anderen Wirkung, das Erdgewicht berechnen. Es ergab sich 4,74, während James aus Arbeiten von Arthur Seat (1865) die Zahl 5,2 erhielt. Diese Resultate sind weniger zuverlässig, weil man das Innere des Berges nicht genau kennt. — 3. Diese Methode beruht darauf, daß die Länge des Secundenpendels an verschiedenen Orten der Anz. prop. ist, und daß diese Anz. der Masse direct und dem Quadrat der Entf. umgekehrt prop. ist. Ist das Vol., die Dichte, der Radius der Erde = V, D, R, dagegen für einen Berg das Vol. v, die Dichte d, die Entf. des Schwerpunktes vom Gipfel = r, die Pendellänge auf der Erdoberfläche = l, die auf dem Berggipfel nöthige Verlängerung = λ, so ist $\lambda : l = (dv/r^2):(DV/R^2)$, woraus $D = dv\,l R^2 / V \lambda r^2$, wonach D zu berechnen ist. Carlini verglich (1824) die Pendellänge auf dem Mont-Cenis mit derjenigen in Bordeaux und fand D = 4,4. Airy ließ sein Pendel (1854) auf der Erdoberfläche und auf dem Boden eines 400m tiefen Schachtes schwingen und fand D = 6,57. — Die Ungleichheiten rühren von der verschiedenen Dichte der Erde an verschiedenen Orten her, die auf das Pendel wirken; über großen Eisenlagern schwingt das Pendel schneller, über großen Weltmeeren langsamer. Die Verschiedenheit der Dichte an der Oberfläche und im Inneren erklärt auch, daß Newton die Abplattung aus theoretischen Rechnungen größer fand als sie ist; er nahm die Gesammtdichte der Erde = derjenigen der Oberflächenschichten, wodurch die anziehende Wirkung der inneren Massen kleiner und dadurch die Wirkung der Schwungkraft der äußeren Massen verhältnißmäßig größer wurde.

4. Große Erwartungen hinsichtlich des Nachweises astronomischer Eigenschaften und der genauen Lösung astronomischer und terrestrischer Größenfragen hegt man von dem Horizontalpendel, das schon vor fast 50 Jahren von Hengler in München erfunden und unter dem Namen Pendelwage zu Demonstrationen der physischen Astronomie benutzt worden, jedoch ganz verschollen war, aber von Zöllner neu erfunden, vervollkommnet und zu zahlreichen Anwendungen geeignet erklärt wurde. Man denke sich eine Stange nicht weit von ihrem einen Ende an einem Faden aufgehängt; dann wird ihr längerer Theil herabhängen. Befestigt man nun im Endpunkte des kürzeren Theiles an dessen unterer Seite einen zweiten Faden, so kann man mittels desselben den kürzeren Theil herab und den längeren

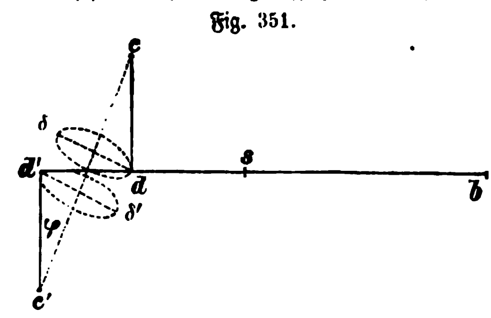
hinauf ziehen, so lange bis der Hebel wagrecht hängt. Wird sodann dieser zweite Faden an einem tiefer liegenden Punkte angehängt, so hat man das Horizontalpendel (Fig. 350 und 351). Sind die beiden Aufhängepunkte c und c′ in einer Lothrechten (Fig. 350), so dreht sich das Pendel, wenn man es bei b faßt und immer voranzieht, in einer hor. Kreisebene um die Achse cc′; denn jeder der beiden schiefen Fäden cd und c′d′ behält seine Länge und dreht sich um die Achse cc′, beschreibt also einen Kegelmantel; daher beschreiben die Befestigungspunkte d und d′ auf der Achse senkrechte, d. i. wagrechte Kreisebenen, also auch alle Punkte von dd′ oder von d′db; folglich wird der Schwerpunkt s des Hebels weder gehoben, noch gesenkt, der Hebel bleibt in jeder Lage, abgesehen von der Torsion, in Ruhe, er ist in indifferentem Gleichgewichte, wie jede Drehwage.

Fig. 350.



Er kann daher auch wie jede Drehwage durch die geringste Kraft aus seiner Lage gebracht werden; jedoch unterscheidet er sich von der Drehwage vortheilhaft darin, daß bei dieser die Wirkungen paralleler Kräfte z. B. der Anziehung des Mondes oder der Sonne, der el. oder magn. Kräfte der Erde u. s. w. sich gegenseitig aufheben, da sie auf beide Seiten dieses 2armigen Hebels gleich stark, aber entgegengesetzt drehend wirken, während das Horizontalpendel als einarmiger Hebel von solchen Kräften nur auf der einen Seite ergriffen wird und daher durch die geringste Kraft schon eine starke Veränderung erfährt; seine Empfindlichkeit ist, abgesehen von der Torsion, unendlich groß. Indessen läßt es sich auch weniger empfindlich machen, und zwar einfach dadurch, daß wie in Fig. 351 die beiden Aufhängepunkte c und c′ nicht lothrecht über einander angebracht werden. Bei einer Drehung des Hebels d′db beschreiben auch hier die Fäden cd und c′d′ Kegelmäntel und ihre Endpunkte d und d′ Kreise, die auf der Kegelachse senkrecht stehen. Diese Kreise sind jedoch nicht wagrecht, weil die Achse nicht lothrecht ist. Nach einer halben Drehung z. B. ist d nach δ, seiner höchsten Lage gelangt und senkt sich bei weiterer Drehung wieder bis in die tiefste Lage d; ebenso hebt sich auch d schon, wenn der Hebel nur wenig aus seiner ursprünglichen Lage gebracht wird. Da aber der Schwerpunkt s des ganzen Pendels auf derselben Seite der Achse wie d liegt, so muß sich auch s bei jeder Drehung des Hebels aus seiner ursprünglichen Lage heben. Ein gehobener Schwerpunkt, der nicht unterstützt ist, fällt in die tiefste Lage zurück; folglich kehrt das Pendel nach jeder Ablenkung vermöge der Schwere in die ursprüngliche Lage zurück, es ist in dieser Lage in stabilem Gleichgewichte.

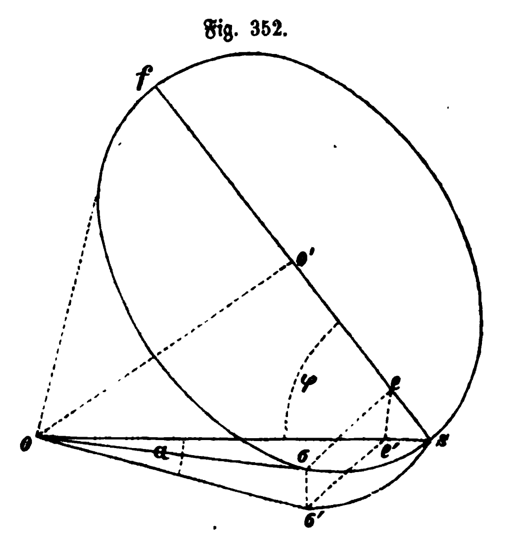
Fig. 351.



Die Rückkehr geschieht durch Schwingungen, wodurch die genauen Beobachtungs- und Rechnungsmethoden der Schwingungslehre hier Anwendung finden. Wegen der stabilen Gleichgewichtslage ist diese Einrichtung weniger empfindlich als das Pendel mit lothrechter Achse; jedoch kann seine Empfindlichkeit nach Belieben gesteigert werden, indem man die Achse cc′ beliebig der Lothrechten nähert; dadurch wird die Hebung des Schwerpunktes bei kleinen Ablenkungen und daher auch die Arbeit für diese Hebung beliebig klein, so daß dieselbe schon von kleinsten Kräften geleistet werden kann. Schärfer erhellt dies aus der Theorie des Horizontalpendels (Stoll 1876): Das ursprünglich in hor. Lage befindliche Pendel beschreibt bei einer ganzen Umdrehung den Mantel eines Rotationskegels, dessen Achse cc′ (Fig. 351) um den ∡ φ gegen die Lothrechte geneigt ist, sein Schwerpunkt s also einen Kreis, dessen Ebene ein auf der Rotationsachse cc′ senkrechter Schnitt des Kegels und um den ∡ φ gegen die Horizontalebene geneigt ist. In Fig. 352 sei dieser Kreis durch sσ dargestellt, sein Mittelpunkt sei o′, seine Achse oo′, wobei o den Punkt bedeute, in welchem die Achse die durch s gehende Horizontalebene schneidet. Bei der Drehung des Pendels um den Horizontalwinkel α gelange s nach σ. Beschreibt man nun mit dem Halbmesser os in jener Horizontalebene den Bogen sσ′, der den ∡ α mißt, verbindet den Endpunkt σ′ mit σ, so liegt, wenn α hinreichend klein genommen wird, σ nahezu senkrecht über σ′, und es ist außerdem oσ = oσ′ = os = r.

Legt man ferner durch $\sigma\sigma'$ eine Ebene, die senkrecht auf os steht, so ist $\sigma\sigma' = ee' = e's$ tang φ. Wenn nun der Schwerpunkt aus der Lage σ in die Lage s zurückschwingt, so erlangt er dort eine Geschw. v_1, die so groß ist, als ob er senkrecht im freien Falle durch $\sigma\sigma'$ herabgefallen wäre, und die also gefunden wird durch die Formel $v_1^2 = 2g \,.\, \sigma\sigma' = 2g \,.\, e's$ tang φ. Gibt man einem gewöhnlichen Verticalpendel von derselben Länge r die nämliche Elongation α, so erlangt sein Schwerpunkt in der tiefsten Lage eine Geschw. v, die durch die Fl. $v^2 = 2g \,.\, e's$ gefunden wird; daher entsteht die Prop. $v^2 : v_1^2 = g : g$ tang φ. Bei zwei Pendeln von gleicher Länge aber, die aus gleicher Elongation durch verschiedene beschleunigende Kräfte g und g' zurückkehren, besteht nach derselben Fl. auch die Prop. $v^2 : v_1^2 = g : g'$, woraus sich ergibt, daß die beschleunigende Kraft des Horizontalpendels $g' = g$ tang φ. Wenn demnach der $\measuredangle\, \varphi$ sehr klein ist, so ist auch die Kraft, welche das Pendel zurückführt, sehr klein, und kann demnach das Pendel durch die geringste Kraft aus seiner Lage abgelenkt und daher zum Nachweise kleinster Kräfte benutzt werden. Für die Schwingzeit gilt die Formel $t = \pi \sqrt{(l/g \text{ tang } \varphi)}$, woraus ersichtlich ist, daß das Horizontalpendel bei einem kleinen φ bedeutend langsamer schwingt als ein Verticalpendel von gleicher Länge, wodurch die Genauigkeit der Beobachtung wesentlich gefördert wird. Wird φ größer als 45°, so wird die Schwingzeit kleiner als beim Verticalpendel und kann durch wachsendes φ zu beliebiger Kleinheit herabgehen. Man kann sich leicht durch den Versuch überzeugen, daß bei sehr schiefer Lage der Rotationsachse die Schw. des Horizontalpendels viel rascher als die des V.-P. geschehen; doch ist dies unwesentlich, da dann die zurückführende Kraft in demselben Maße zunimmt und daher keine Anwendung zuläßt. Die Anwendung setzt ein kleines φ voraus, da alsdann die kleinste Kraft schon zur Ablenkung ausreicht; da das Pendel durch die Schwerkraft zurückgeführt wird, so muß auch die geringste Aenderung derselben sich schon in den Schw. des Pendels abspiegeln; daher ist es anwendbar zur Erkennung von Aenderungen der Schwere und der Centrifugalkraft der Erde, zum Messen der Erddichte und der Erdbeben, zum Nachweise der Erdbewegungen. Dann ist es wegen seiner Empfindlichkeit und seiner einarmigen Beschaffenheit verwendbar, um die Verschiedenheit der Anziehung von Sonne oder Mond in versch. Entfernungen, sodann diese Entf. selbst und die Massen von Sonne und Mond zu bestimmen, ja man hofft sogar die Schnelligkeit der Fortpflanzung der Gravitation mittels desselben auffinden zu können. Die große Empfindlichkeit, welche es für solche Messungen haben muß, ist allerdings auch eine Fehlerquelle, da es alsdann von allen Massenwirkungen des öffentlichen Lebens, von Luft, Wärme und Licht beeinflußt wird; so zeigte Zöllners Pendel in dem Keller der Leipziger Sternwarte schon eine Ablenkung, als der Hörsaal sich füllte.

Fig. 352.



4. Die tägliche Bewegung, Achsendrehung oder Rotation der Erde (Aristarch aus Samos 279 v. Chr., Copernicus 1543). 539 Die Erde hat zwei Bewegungen, eine tägliche Drehung um sich selbst und eine jährliche drehende Bewegung um die Sonne; die erstere nennt man auch Achsendrehung oder Rotation, die letztere Umlauf oder Revolution. Die Rotation besteht darin, daß alle Punkte der Erde in gleicher Zeit, in einem Sterntage, vollständige Kreise beschreiben, mit Ausnahme der Punkte des kleinsten Durchmessers, den man deßhalb auch die Erdachse nennt. Die Erdachse ist also die gerade Verbindungslinie aller Punkte der Erde, welche bei der täglichen Drehung der Erde in Ruhe bleiben; die beiden Endpunkte der Achse auf der Oberfläche heißen Pole, der auf der nördlichen Halbkugel liegende Pol der Nordpol, der andere Südpol. Die Achse enthält die Mittelpunkte aller von den Erdpunkten beschriebenen Kreise, deren Größe mit der Entfernung der Punkte von der Achse zu-

nimmt. Die von den Oberflächenpunkten beschriebenen Kreise werden Parallelkreise genannt; der größte derselben, der in der Mitte zwischen Nord- und Südpol liegt, heißt Aequator. Derselbe wird, wie jeder Kreis in 360 Grade getheilt und ist, da jeder Grad in 15 geogr. M. getheilt ist, 5400 M. lang. Kreise, welche durch die Erdachse gelegt sind, werden Mittagslinien oder Meridiane genannt; der Meridian eines bestimmten Ortes geht durch diesen Ort und die beiden Pole. Die Parallelkreise, welche 23½° der Meridiane von den Polen abstehen, heißen Polarkreise; die, welche 23½° vom Aeq. entfernt sind, Wendekreise, und zwar der nördliche Wendekreis des Krebses und der südliche Wendekreis des Steinbocks. Meridiane und Parallelkreise dienen auch zur Ortsbestimmung auf der Erde; man kennt die Lage eines Ortes, wenn man seine Entfernungen von 2 sich senkrecht durchschneidenden festen Linien kennt. Als solche Linien sind festgestellt der Aequator und der Meridian von Ferro (oder Greenwich). Den Bogenabstand eines Ortes vom Aequator, auf dem Meridian des Ortes gemessen, nennt man die geographische Breite; den Bogenabstand eines Ortes vom ersten Meridian, auf dem Parallel des Ortes gemessen, nennt man die geographische Länge.

Positive Beweise für die Drehung der Erde um sich selbst sind: 1. Newtons Fallversuch: Wenn die Erde sich um sich selbst dreht, so muß ein Stein auf der Spitze eines Thurmes eine größere westöstliche Geschw. haben als der Fuß desselben; da der fallende Stein nach dem Gesetze der Trägheit seine größere westöstliche Geschw. während des Falles nicht ändert, so muß er etwas östlich von dem Fußpunkte des Lothes zu Boden fallen. Aus dem Radius der Erde und der Höhe des Thurmes läßt sich diese Abweichung berechnen. Bei den Versuchen von Benzenberg (1802) am Michaelisthurme in Hamburg und von Reich (1832) in einem 488′ tiefen Schachte bei Freiberg stimmten die Resultate sowohl der Art als der Größe nach mit der Rechnung überein. Da während des Falles der Stein nach dem Gesetze der Trägheit in der Richtung der Tangente seines Parallelkreises weiter geht, so muß er auch etwas südlich vom Fußpunkte des Lothes zu Boden fallen, was Reichs Versuche bestätigen. — 2. Foucaults Pendelversuch (1851). Nach dem Gesetze der Trägheit kann ein Pendel seine Schwingungsebene nicht von selbst ändern; folglich muß diese Schwingungsebene ihre Lage gegen den Meridian ändern. Diese Aenderung ist dem Sinus der geogr. Breite proportional, kann also für jeden Ort berechnet werden. Da sie an allen Orten durch Versuche sich genau so groß wie durch die Rechnung ergibt, so ist die Voraussetzung der letzteren, die Rotation der Erde hierdurch bewiesen (140. 11). — 3. Henglers Pendelwageversuch. Weil die Centrifugalkraft die Richtung des Radius des Parallelkreises hat und diese auf unserer Halbkugel von dem Radius der Erde nach Süden abweicht, so hat die Schwungkraft auch eine südlich gerichtete Componente, die in größerer Höhe mit der Centrifugalkraft wächst. Wenn sich demnach die Erde wirklich dreht, so muß ein in größere Höhe gebrachter Körper ein größeres Streben nach Süden haben als vorher. Das Horizontalpendel allein ist empfindlich genug, diesen geringen Unterschied auffällig zu machen und so einen neuen directen Beweis zu ermöglichen. Als Hengler demselben eine westöstliche Richtung gab, und ein am Ende tief hinab hängendes Gewicht in die Höhe zog, zeigte sich eine deutliche Pendelablenkung nach Süden; dasselbe muß stattfinden, wenn man den Gewichtfaden durchbrennt. — 4. Die Abnahme der Schwere vom Aequator nach den Polen zu hat zwei Ursachen: die Abplattung und die Centrifugalkraft; letztere vermindert die Schwere gemäß der Größe des Radius des Parallelkreises und gemäß dem Winkel, den dieser Radius mit dem betreffenden Erdradius macht. Man kann für jeden Erdpunkt diese Verminderung berechnen, und findet sie durch Pendelversuche größer; hierdurch wird die Richtigkeit der Voraussetzung, die Abplattung und die Rotation bewiesen. — 5. Die Abplattung der Erde ist nur durch die Rotation derselben erklärlich. Bestätigungen dieser Erklärung liegen in der großen Abplattung der rasch rotirenden Planeten und in der kleinen Abplattung der langsam rotirenden Planeten. — 6. Die östliche Wendung der Nord- und die westliche der Südwinde. Südwinde kommen bei uns aus Gegenden größerer westöstlicher Geschw. nach Gegenden von geringer Geschw., müssen aber nach dem Gesetze der Trägheit ihre frühere Geschw. noch beibehalten und daher rascher nach Osten laufen als wir, und sonach allmälig westlich werden. Aus dem entgegengesetzten Grunde müssen Nordwinde unter Voraussetzung der Drehung der Erde östlich werden. Da diese Wendung bei allen Nord- und Südwinden unzweifelhaft fest steht, so ist hiermit die Voraussetzung derselben, die Drehung der Erde bewiesen. — Negative Beweise für die Rotation der Erde sind: die Drehung aller Gestirne in gleicher Zeit um die Erde. Die Gestirne haben die verschiedenste Entf. von der Erde und drehen sich alle in gleicher Zeit von Osten nach Westen

um dieselbe; dies erklärt sich einfach durch die Drehung der Erde um sich selbst, bleibt aber ohne diese unerklärlich. — Die Fixsterne sind Billionen, die Sonne Millionen, der Mond Tausende von M. von uns entfernt; würden sie sich in Wahrheit um die Erde drehen, so müßten die Fixsterne unendlich große Geschw. haben; und die unendliche Zahl der verschiedenen Fixsterne, deren Entf. von uns sehr verschieden sind, die Sonne, die Planeten, der Mond müßten so gegen einander abgemessene Geschw. besitzen, daß sie die verschiedensten Wege in gleichen Zeiten durchlaufen könnten. Dies ist nicht denkbar; durch die Drehung der Erde aber erklärt sich die Erscheinung sehr einfach. — Um die gewaltige tägliche drehende Bewegung aller Gestirne um die Erde zu erklären, müßte eine überaus große anziehende Kraft in der Erde angenommen werden, welche nicht vorhanden ist; außerdem müßte diese Kraft auf die entfernteren Körper viel stärker wirken als auf die näheren, was aller Erfahrung widerspricht; endlich drehen sich auch die meisten Gestirne in täglichen Kreisen, deren Mittelpunkte weit außerhalb der Erde liegen, an Stellen, wo keine Kräfte wirken. Die Annahme der Rotation der Erde löst alle diese Widersprüche.

Die Rotation der Erde wurde schon von griechischen Astronomen angenommen, von Ptolemäus aber widerlegt; im Mittelater hat Nicolaus de Cusa die Bewegung der Erde einmal besprochen; allein erst Copernicus hat dieselbe consequent durchgeführt.

Dieselben Linien, die auf der Erdkugel als Grundlage der Messungen dienen, hat man auch an der concentrischen Himmelskugel eingeführt. Die Verlängerung der Erdachse durch den ganzen Himmelsraum nennt man *Weltachse*; die Punkte, wo sie die Himmelskugel schneidet, also die Zenite des irdischen Nord- und Südpoles nennt man *Nordpol* und *Südpol* des Himmels. Die Verbindungslinie der Zenite aller Punkte des Erdäquators bildet den *Himmelsäquator*, einen größten Himmelkreis, der genau in der Mitte zwischen Nord- und Südpol die Himmelskugel halbirt und dessen Ebene der erweiterte Erdäq. ist. Kreise durch einzelne Punkte des Himmels parallel zu dem Himmelsäquator sind *Himmelsparallelen*, größte Kreise durch solche Punkte und die beiden Himmelspole gelegt sind *Himmelsmeridiane*.

5. **Die jährliche Drehung oder Revolution** der Erde um die Sonne (Aristarch 279 v. Chr., Copernicus 1543). Die Erde dreht sich jährlich einmal um die Sonne, von W. über Süden nach O.; die Bahn ist eine ebene, sehr kreisähnliche Ellipse, deren Excentricität = 0,017, d. i. der Abstand des Brennpunktes vom Mittelpunkte der Bahn beträgt 0,017 der halben großen Achse. Die Bewegung der Erde in dieser Bahn ist nicht gleichförmig, sondern gehorcht dem zweiten Keppler'schen Gesetze, nach welchem die größte Geschwindigkeit im Perihel, die kleinste im Aphel stattfindet; die mittlere Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn beträgt ca. 4 Meilen. 540

Gründe für die Revolution sind: 1. Allgemeinheit der Bewegung im ganzen Himmelsraume. Alle Himmelskörper bewegen sich, weil sie frei im Weltraume schweben und von anderen Himmelskörpern angezogen werden; so muß auch die frei im Weltraume schwebende Erdkugel sich fortbewegen. 2 Uebergewicht der Sonnenmasse. Die Masse der Sonne ist 325000 mal so groß als die der Erde; folglich muß die aus der Anziehung der beiden Weltkörper entstehnde Bewegung derselben für die Erde sehr viel größer sein als für die Sonne; die Erde müßte in die Sonne stürzen, was nur durch die leb. Kft. einer fortschreitenden Bewegung verhindert werden kann. Vermöge dieser leb. Kft. würde die Erde sich in gerader Linie in den Weltraum fortbewegen, wenn sie nicht durch die Anziehung der Sonne fortwährend von der geraden Linie abgelenkt würde; folglich muß sich die Erde um die Sonne drehen. Aus diesen Gründen müssen überhaupt kleinere Weltkörper sich um den nächsten größeren drehend bewegen. Dies bestätigen 3. die Monde größerer Planeten, des Jupiter und Saturn, welche um dieselben kreisen und, 4. die Planeten, welche in ähnlichen Entfernungen von der Sonne stehen wie die Erde und sich ebenfalls um die Sonne drehen. 5. Die Planeten folgen dem dritten Keppler'schen Gesetze, die Quadrate ihrer Jahre verhalten sich wie die Cuben ihrer Entf. von der Sonne; demselben Gesetze folgt die Erde; daher ist sie auch ein Planet, sie muß auch um die Sonne gehen, und da alle Planeten eine westöstliche Revolution vollziehen, so muß die Erde auch diese Richtung haben. 6. Die Fixsterne beschreiben sammt und sonders jährlich eine kleine Ellipse, deren große Achse = 40,5″ bei allen beträgt. Da diese ganz gleiche Bewegung unmöglich den so verschiedenen Fixsternen zugeschrieben werden kann, so muß sie von einer Veränderung der Erde gegen dieselben herrühren, davon, daß die Erde den Lichtstrahlen der Fixsterne in derselben Weise ausweicht, wie sie von den verschiedenen Punkten der kleinen Ellipse auszugehen scheinen, also davon, daß die Erde eine ähnliche Ellipse beschreibt. 7. Ein Hauptgrund für die 2 Bewegungen der Erde liegt aber darin, daß durch dieselben eine große Anzahl von Himmelserscheinungen sich in einfacher, ungekünstelter Weise erklärt, und daß insbesondere die auf Grund dieser Bewegungen gemachten Vorausberechnungen der Himmelserscheinungen ohne Ausnahme immer

zu der berechneten Zeit eintreffen. — Nach Gruithuisens Meinung kann Henglers Pendelwage auch zu einem directen Nachweise der Revolution der Erde dienen, da auf der Erdseite, wo die Richtung der Rotations- und der Revolutionsbewegung übereinstimmen, die Centrifugalkraft eine größere sein muß als an anderen Stellen.

541 **Aufg. 815.** Wie groß ist die Weite des Horizontes eines fünffüßigen Beobachters? Aufl.: $5 : r = r : d + 5'$, worin d der Dm. der Erde = 1718 M.; hieraus $r^2 = 5(d+5)$ $= 5(1718 . 23643 + 5)$, also $r = 14251'$. — A. 816. Wie groß ist der Hor. in einer Höhe von 500'? Aufl.: 6,028 M. — A. 817. Wie weit sieht man in einer Höhe von 1000'? Aufl.: 8,52 M. — A. 818. Wie weit ist der Hor. in einer Höhe von 25000'? Aufl.: 43,63 M. — A. 816. Man kann den Hor. auch in einem rechtwinkeligen Dreieck ausrechnen, dessen Hypotenuse die Summe des Erdradius r und der Höhe h des Beobachtungsortes ist, dessen eine Kathete der Erdradius r und dessen andere Kathete die Tangente ist; man rechnet den Winkel α aus, den der Radius des Beobachtungsortes mit dem Radius des Berührungspunktes einschließt und findet hieraus die Größe des zugehörigen Erdbogens; wie groß ist der Winkel und der Bogen? Aufl.: $\cos \alpha = r/(r + h)$; $b = d\pi\alpha/360$. — A. 820. Wie groß ist der Winkel und der Bogen auf dem Pic von Teneriffa, wenn $h = 11500'$ und $r = 859,43$ M.; Aufl.: $\alpha = 1^\circ 55' 38''$, $b = 28,9$ M. — A. 821. Glaisher und Coxwell stiegen am 5. Sept. 1852 mit einem Luftballon zu einer Höhe von 37000'; welchen Bogen hätten sie übersehen können, wenn sie nicht das Bewußtsein verloren hätten? Aufl.: $\alpha = 3^\circ 27' 18''$; ganze Weite 103,6 M. — A. 822. Wie hoch müßte man sich erheben, um Deutschland in seiner größten Ausdehnung (12°) übersehen zu können? Aufl.: 4,73 M. — A. 823. Wie hoch, um ganz Europa übersehen zu können? Aufl.: 262,48 M. — A. 824. Der Chimborazo ist 20400' = 0,863 M. hoch; in welcher Entf. von seinem Fuße verschwindet dem Seefahrer die Bergspitze; Aufl.: $\cos \alpha = r/(r + h)$, wo r der Erdradius, oder $\sin \frac{1}{2}\alpha$ $= \sqrt{[h/2(r+h)]}$ oder annähernd $\tang \alpha = \sqrt{(2h/r)}$; hieraus $\alpha = 2^\circ 34' = 35,5$ M. — A. 825. Humbold wirft (Kosmos Bd. 2. S. 413) die Frage auf, wie hoch der Punkt der afrikanischen Küste sein müßte, von dem man den Pic von Teneriffa sehen könne, wenn die Bogenentf. β der beiden Punkte $= 2^\circ 49'$ betrage? Aufl.: $\tang \alpha = \sqrt{[(2r + h)h]} : r$, dann ist die gesuchte Höhe $x = r / \cos(\beta - \alpha) - r$; hier ist $\alpha = 1^\circ 55' 38''$, hieraus $x = 2447'$. —

2. Der Himmel.

542 **1. Beschreibung des Fixsternhimmels.** Außer Sonne, Mond, den wenigen mit blosem Auge sichtbaren Planeten, den selten erscheinenden Kometen und den schnell vorüberschießenden Sternschnuppen besteht die Welt der Gestirne, der Himmel, für die gewöhnliche Anschauung aus der großen Zahl von Fixsternen; sie bilden den Fixsternhimmel. Da die Fixsterne ihre gegenseitige Stellung für das gewöhnliche Sehen selbst in Jahrtausenden nicht merklich ändern, so bilden dieselben mit einander unveränderliche Figuren, in denen die Volksphantasie schon in den ältesten Zeiten Gestalten des ländlichen Lebens, der Natur- und Götterwelt erblickte, und welche demgemäß theils durch den Volksmund, theils durch alte Sternkundige Namen erhielten, die in der Astronomie Aufnahme gefunden haben und das Auffinden der Sterne erleichtern; daher ist die Kenntniß dieser Sternbilder oder Constellationen für das Studium der Himmelskunde zu empfehlen. Außer der Betrachtung der Constellationen gehört zur Beschreibung des Fixsternhimmels die Vergleichung der Größe oder des Glanzes der Fixsterne, die Zahl derselben, die Farbe und der Wechsel von Glanz und Farbe.

a. Die Größe und Zahl der Fixsterne. Die Fixsterne erscheinen für das gewöhnliche Sehen von verschiedener Größe; diese Größe ist aber nur der Eindruck eines größeren oder geringeren Glanzes, einer größeren oder geringeren Lichtstärke; denn durch das Fernrohr erscheinen selbst die größten Fixsterne nur als leuchtende Punkte, und zwar um so schärfer, je besser das Fernrohr ist. Die mit blosem Auge größer erscheinenden Fixsterne sind durch das Fernrohr gesehen nur hellere Punkte. Nach der Lichtstärke theilt man die Sterne, welche mit blosem Auge sichtbar sind, in Sterne erster bis sechster Größe, die nur mit Fernrohren sichtbaren, die sogenannten teleskopischen Sterne, in solche siebenter bis sechzehnter Größe. Früher geschah diese Eintheilung nur nach der Abschätzung des Lichteindruckes. John Herschel (1833—38) benutzte zuerst ein Astrometer; Seidel (1852) suchte den Einfluß

auf, welchen die wechselnde Durchsichtigkeit der atmosphärischen Luft zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Höhen auf die Lichtstärke ausübt. Die genauesten Vergleichungen sind mit Zöllners Polarisationsastrometer (1865) zu gewinnen.

Herschels Astrometer bestand im Wesentlichen aus einer kleinen Convexlinse, mittels welcher er ein sternartiges Mondbildchen erzeugte; diesen künstlichen Stern verglich er mit dem Sterne Fomalhaut im südlichen Fisch, indem er sich von seinem künstlichen Sterne so weit entfernte, daß dieser und der natürliche Stern gleich erschienen. Dann suchte er für den zu messenden Stern die Entf., in welcher derselbe ebenfalls dem künstlichen Sterne gleich erschien. Die Lichtstärke dieses Sternes verhielt sich dann nach dem Gesetze in (284.2) zu der des Fomalhaut, die man = 1 setzt, wie die Quadrate der Entf. Zöllner erzeugt den künstlichen Stern durch eine Petroleumflamme, welche seitlich von dem nach dem Himmel gerichteten Fernrohre aufgestellt ist; in diesem befindet sich eine Glastafel unter 45° gegen die Achse geneigt, während neben dieser Glastafel in das erste Fernrohr ein zweites einmündet, das auf dem ersten senkrecht steht und nach der Flamme gerichtet ist. Das zweite Fernrohr enthält Linsen und zwei Nicol'sche Prismen, durch welche die Menge der durchgehenden Flammenstrahlen nach Bedürfniß vermindert werden kann. Diese Str. werden von der Glastafel in das erste Fernrohr reflectirt und dort zu dem künstlichen Sterne vereinigt, wodurch derselbe direct neben dem durch dieses Fernrohr sichtbaren Himmelssterne steht und so mit diesem verglichen werden kann. Aus der Drehung des einen Nicols wird die Schwächung des künstlichen Sternes erkannt, welche für die Gleichheit mit dem natürlichen erforderlich ist. Engelmann hat 1868 in Indien südliche Sterne mit diesem Astrometer gemessen und so gefunden, daß die Lichtstärke von α Centauri = 2,095, Atair = 1,407, Achernar = 1,340, Antares = 1,221; Herschel fand für den ersten Stern am Cap der guten Hoffnung 3,820, welcher Unterschied wohl von der tiefen Stellung desselben in Indien herrührt. — Die Zahl der Sterne erster bis sechster Größe, d. i. der mit blosem Auge sichtbaren Sterne steigt nicht über 6000; in Berlin sind nach Humboldt nur 4000 Sterne sichtbar. Heis, der ein besonders scharfes Auge besaß, zeichnete in seinen Atlas coelestis novus (1872) viel mehr, nämlich 5421 von Münster aus mit blosem Auge sichtbare Sterne (bis zu 6,7. Größe) ein. Die Zahl der kleineren Größenklassen wird indeß immer größer; so gibt es etwa 20 St. 1. Gr., 65 St. 2. Gr., 190 St. 3. Gr., 425 St. 4. Gr., 1100 St. 5. Gr., 3200 St. 6. Gr., 13000 St. 7. Gr. u. s. w.; hieraus folgert Struve, daß mit dem 20füßigen Herschel'schen Spiegelteleskop 20 Mill. Sterne sichtbar sind. Littrow (1869) nimmt an, daß die Sterne uns nur wegen ihrer verschiedenen Entf. von uns ungleich erscheinen, und daß sie im Durchschnitt gleichweit von einander abstehen; aus der Menge der Sterne 1. Gr., die sich innerhalb einer gewissen gedachten Kugelfläche befinden, läßt sich die Menge der St. 3. Gr.; die sich zwischen dieser und einer doppelt so weit entfernten Kugelfläche befinden, ausrechnen; ebenso lassen sich die Sterne 3. bis 7. Gr. auf diese Weise finden; da nun die so berechneten Zahlen mit den gezählten stimmen, so kann man auch die Zahlen der Sterne niederer Größen nach derselben Methode bestimmen. Auf diese Art findet Littrow, daß die Zahl der sichtbaren Sterne 1500 Mill. betrage. Demnach ist jede uns dunkel erscheinende Stelle des Himmels noch mit zahlreichen Sternen besäet; eine wirklich sternenlose Stelle müßte also viel dunkler aussehen, als die blos dunkel erscheinenden Stellen; solch dunklere Flecken aber gibt es am Himmel, die Kohlensäcke genannt werden.

543 b. Farbe und Veränderlichkeit der Sterne. (Fabricius 1596.) Die Farbe der Fixsterne ist verschieden; doch überwiegt Weiß, dann folgen Gelblich und Röthlich. Weiß sind Sirius, Wega, Deneb, Regulus, Spica; gelblich erscheinen Prokyon, Polaris, Pollux; röthlich Arcturus, Beteigeuze, Aldebaran, Antares. Ptolemäus zählt den Sirius unter die röthlichen Sterne; also hat derselbe seine Farbe gewechselt. Der Stern η Argus war bis 1843 gelb, 1850 dunkelroth. Der Stern σ Persei war nach Goldschmidt 1854 rosenroth, 1855 gelb, dann wieder roth, 1856 weiß, dann gelb, dann wieder roth. Noch häufiger sind die Veränderungen in der Lichtstärke, so daß es veränderliche Sterne gibt, von denen man nach Schönfeld bis 1874 143 kannte, deren größere Zahl indeß nur mit Fernrohren sichtbar ist. Fabricius entdeckte das auffallendste Beispiel, o im Wallfisch (Mira ceti), der in einer Periode von 333 T. von 1. bis 12. Gr. schwankt; 4 Monate lang ist er mit blosem Auge sichtbar; während seiner Unsichtbarkeit kann er mit dem Fernrohre gesehen werden, jedoch in der schwächsten Zeit nur mit den besten Instrumenten. Andere Variable verändern ihre Größe ganz regelmäßig, wieder andere ganz unregelmäßig, während ein 4. Typus nur kurze Zeit sich ändert; zu diesem Typus gehört Algol im Perseus, der sich nur 9 St. lang ändert und dann $2^1/_2$ Tag gleich bleibt. Die Veränderung des Algol-Typus erklärt man durch dunkle Begleiter, die den Fixstern theilweise verdecken, die anderen durch partielle periodische Verdunkelungen des Sternes selbst, wie ja auch unsere Sonne durch ihre 11jährige Fleckenperiode etwas ähnliches zeigt, sowie auch durch periodische Revolutionen oder Gasausbrüche. — Auch im Laufe längerer Zeiten treten Veränderungen der Lichtstärke auf; so war

bei den Alten Castor heller als Pollux, während jetzt dieser jenen überstrahlt. — In letzter Zeit wurde ein Beispiel periodischen Farbenwechsels unter den Fixsternen entdeckt. Schon 1867 hatte H. J. Klein bekannt gemacht, daß der Stern α im großen Bären seine Farbe periodisch zwischen feuerroth und gelb wechsele. Weber in Peckeloh beobachtete (1876) genauer, daß dieser Wechsel genau alle 33 Tage stattfinde, daß innerhalb dieser Periode der Stern für kurze Zeit feuerroth, sonst aber weißgelb sei.

c. Neu erschienene und wieder verschwundene Sterne. Tycho de Brahe (1572) bemerkte in der Cassiopeja an einer Stelle, die sonst nur ganz kleine Sterne zeigte, plötzlich einen Stern von mehr als 1. Gr., so hell strahlend, daß er selbst bei Tage gesehen werden konnte; er wechselte Farbe und Glanz und verlosch allmälig nach 17 Mon.; vor 40 Jahren fand Argelander an dieser Stelle keinen Stern, während d'Arrest in neuerer Zeit einen Stern 11. bis 12. Gr. dort sah, der noch immer an derselben Stelle steht. Der Tychonische Stern ist demnach wohl ein veränderlicher Stern von sehr großer Periode, der in der Zeit des Minimums außerordentlich schwach und jetzt im Wachsen begriffen ist. Humboldt zählte aus historischen Nachrichten seit 2000 J. 20 neu erschienene und wieder verschwundene Sterne. Großes Aufsehen erregte 1866 der Stern, welcher plötzlich in der nördlichen Krone aufblitzte, nahezu die Helligkeit von Gemma erreichte und dann allmälig verschwand. Nach Julius Schmidt in Athen ist er identisch mit einem Sterne 9. bis 10. Gr., der in Argelanders Katalog verzeichnet ist. Huggins untersuchte ihn mit einem guten Spectroskop und fand, daß er 2 Spectra hatte, ein Absorptionssp. wie die anderen Fixsterne, und ein Streifensp., das die Wasserstofflinien enthielt, woraus deutlich hervorgeht, daß das Aufblitzen des Sternes einer glühenden Wasserstofferuption zuzuschreiben ist. Im Jahre 1876 erschien im Schwan ein neuer St., dessen continuirliches Sp. mit seinem Glanze abnahm, während die hellen Linien blieben; hier muß eine Revolution vorausgesetzt werden, welche die Abkühlungsrinde zerbrach, während die Abkühlung selbst fortdauernde Verbrennung möglich macht.

545 d. Die Sternbilder oder die Constellationen. Beim Aufsuchen derselben geht man am besten von dem großen Bär aus, weil derselbe leicht erkennbar und im Ganzen in jeder heiteren Nacht sichtbar ist.

a. Sternbilder des nördlichen Himmels. 1. Der große und der kleine Bär und der Bärenführer oder Bootes (Fig. 353). Der große Bär ist leicht an 7 ziemlich gleichen Sternen 2. u. 3. Gr. zu erkennen, von denen 4, α, β, γ und δ, ein Paralleltrapez bildend, einen Theil des Körpers und die 3 übrigen, ε, ζ, η, den Schwanz darstellen. Häufig wird die Figur dieser 7 Sterne auch als Siebengestirn und als Wagen bezeichnet, die 4 St. als Räder, die 3 als die Deichsel. Kopf u. Füße des Bären sind durch kleine Sternenpaare angedeutet. Wenn man durch die 2 letzten Trapezsterne eine gerade Linie zieht gleich dem fünffachen Abstande derselben, so gelangt man zu den Schwanzsterne des kleinen Bären, der 7 kleinere, eine dem Siebengestirne des großen Bären ähnliche, aber kleinere Figur bildende St. enthält. Der Schwanzstern α ist der Nordpolarstern (Polaris). Wenn man den Bogen der 3 Schwanzsterne des großen Bären verlängert, etwa um den sechsfachen Abstand der letzten 2 Schwanzsterne, so gelangt man zu einem St. 1. Gr., Arcturus oder α des Bootis. Dieser St. bildet mit 2 dr. Gr. ein die Beine bezeichnendes Dreieck; ganz nahe bei dem Schwanze des großen Bären stellt ein 2. Dreieck von 3 St. 3. Gr. den Kopf und die Schultern dar, während der Gürtel durch einen St. 3. Gr. und mehrere kleinere St. gebildet wird. Diese 3 Bilder verewigen die Sage von Kallisto, der Königin, und Arkas, dem Prinzen von Arkadien, welche von Jupiter in Bären verwandelt und an den Himmel versetzt wurden, sich aber nicht in dem reinen Schooße des Okeanos erfrischen dürfen (Ovid, Metamorphosen, II. 496). Bootes wird für Lykaon, den Großvater des Arkas, gehalten, der seinen Enkel geschlachtet dem Jupiter als Speise vorgesetzt hatte. — Einige kleine St. unter dem Schwanze des gr. B. sind mit dem Namen Jagdhunde belegt worden (Hevel 1690); der St. a am Halsbande des einen heißt nach Flamsteed das Herz Carls II. Jenseits der Jagdhunde, noch etwas weiter vom Bärenschwanze entfernt, ist eine dichte Gruppe

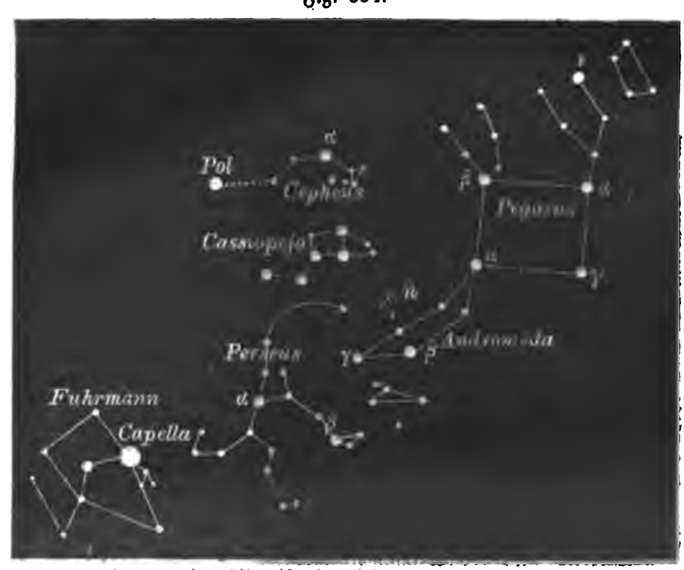
Fig. 353.



sehr kleiner St. d, welche der alexandrinische Astronom Konon (230 v. Chr.) Haupthaar der Berenike nannte, zu Ehren des aus dem Tempel verschwundenen Haares der Königin von Aegypten, der Gemahlin von Ptolemäus III. Euergetes. Zwischen dem großen und kleinen Bären zieht sich eine gewundene Linie von St. mit einem Viereck $\beta \gamma \xi \nu$ beginnend, das aus St. 3. Gr. besteht, von denen der hellste (γ) Etanin heißt. Diese Fig. ist der Drache und stellt den von Herkules überwundenen Hüter der hesperischen Aepfel dar.

2. Cepheus und Cassiopeja, Perseus und Andromeda, nebst dem Pegasus verewigen den Sagenkreis von Andromeda und Perseus (Fig. 354). Der Cepheus steht vom großen Bären aus jenseits des kleinen Bären; er tritt auf den Polarstern, 2 St. 3. Gr. bezeichnen Knie und Gürtel, 1 St. 2. Gr. α die Schulter und 3 kl. St. den Kopf. Er ist der Vater der Andromeda; gerade vor ihm sitzt Cassiopeja, die Mutter, in welcher die Figur begrenzende Sterne ein römisches W bilden. Dann folgt nach derselben Richtung hin Perseus mit über dem Haupte geschwungenen Schwerte; die Sterne, welche seine rechte Seite bis zum gebogenen Knie begrenzen, bilden eine Figur wie die links gekrümmte

Fig. 354.



Ziffer 6, 1 St. 2 Gr., α oder Algenib, in dieser Seite bildet mit 3 anderen kleineren St. den Körper, neben welchem durch einen St. der linke Arm bezeichnet ist, der das Haupt der Medusa trägt. Dieses enthält den veränderlichen Stern β oder Algol. Zur Linken liegt Andromeda, der eine Fuß stößt an das Schwertende des Perseus, der andere ist durch den St. γ, Alamak, angegeben, einen St. 2. Gr., während der Körper von 2 Sternenpaaren begrenzt erscheint, von denen β oder Mirach ebenfalls 2. Gr. ist; auch der Kopfstern α oder Sirrah besitzt diese Größe. Dieser bildet mit 3 St. des Pegasus α, β und γ (2. Gr.) ein ziemlich regelmäßiges Viereck, der Tisch des Pegasus oder das Trapez genannt. Der Kopf des Pegasus ist durch den St. ε (Enif) dargestellt. Zur Seite des Kopfes befindet sich ein Viereck von kleinen St., den Kopf des Füllens, des kleinen Pferdes vorstellend. Der Wallfisch, das Ungeheuer, welchem Andromeda geopfert werden sollte, befindet sich von dieser Gruppe getrennt, am südlichen Sternenhimmel. Auf der rechten Seite des Perseus steht ein Sternbild, der Fuhrmann, in Form eines unregelmäßigen Fünfecks, das von einem St. 1. Gr., der Capella, 2 St. 2. Gr. und 2 St. 3. Gr. gebildet wird, innerhalb dessen 1 St. 2. Gr. steht. Es stellt den Erfinder des Wagens, König Erichthonius von Athen vor; er trägt auf seinem Arme die Ziege der Amalthea, die das Kind Jupiter nährte; die drei kleinen Sterne unter der Capella heißen Zicklein. Auf der rechten Seite der Andromeda steht ein mit bloßem Auge sichtbarer Nebel n. An der linken Seite bilden 3 St. den großen Triangel, ein kleines Dreieck. Der sternarme Raum zwischen dem Fuhrmann und dem Nordpol hat Gelegenheit geboten, die Bilder Giraffe, Rennthier, Erntehüter (Messier) anzubringen, sowie der Raum zwischen Pegasus und Cepheus von Bode für das Sternbild Friedrichsehre (Schwert und Lorbeerkranz) benutzt wurde, neben welchem einige kleine Sterne die Eidechse bilden.

3. **Der Schwan und die Leier** (Fig. 355). Zwischen Cepheus und Pegasus steht etwas abwärts in der Milchstraße ein ganz regelmäßiges sehr großes Kreuz, gebildet von einem hellen St. 2. Gr. **Deneb** (α), der sich gerade an einer Spaltung der Milchstraße befindet, 3 St. 3. Gr. und 1 St. 4. Gr.; dieses Sternbild heißt der Schwan. Deneb bildet mit anderen kleineren St. den Körper; die Kreuzarme, an die sich kleinere St. anschließen, bilden die Flügel und der lange Fuß des Kreuzes den Schnabel. Der Schwan stellt den Sänger Orpheus vor. Neben dem Schnabel befindet sich die Leier des Sängers, in welcher 1 St. 1. Gr., **Wega** genannt, erglänzt. Auf der anderen Seite des Schnabels bilden einige kleine St. den **Pfeil**; zwischen diesem und dem Körper des Schwans ist das Sternbild **Fuchs** und in der Verlängerung des Schnabels die **Gans** angebracht. Jenseits des Pfeils steht wieder 1 Stern 1. Gr., **Atair** im **Adler**, dessen Kopf von diesen St., 1 St. 3. Gr. und 1 St. 4. Gr., die in gerader Linie stehen, dargestellt ist, während der Schwanz durch eine ähnliche parallele von 3 ganz kleinen St. gebildete Linie angegeben wird. Der Schnabel des Adlers berührt den Kopf des **Antinous**, eine aus lauter kleinen St. zusammengesetzte Figur. Jupiter verwandelte sich in einen Adler, um den schönen Jüngling Ganymed zu rauben; diese Mythe soll in den 2 Bildern verewigt sein; erst Tycho de Brahe gab dem letzten Bilde den Namen Antinous. Auf der dem Antinous entgegengesetzten Seite des Adlers befindet sich das niedliche Sternbild des **Delphins**, der den Arion an das Land trug und dafür von Jupiter in den Himmel aufgenommen wurde.

Fig. 355.



4. **Herkules und der Schlangenträger** (Fig. 355). Das große Sternbild des Herkules neben dem Schwane und der Leier tritt mit dem linken Fuße auf den hellsten St. (Etanin) im Drachenkopfe und enthält viele St. 3. und 4. Gr., welche die Hauptlinien des Körpers begrenzen. Die Herkulesstirn bezeichnet ein St. 3. Gr. Ras Algethi. Der Stern λ im linken Arme gibt die Stelle an, wohin unser Sonnensystem in unserem Jahrhundert seine absolute Bewegung richtet. In der linken Hand trägt Herkules seine Schlangen, die durch ein Sterngewimmel erkennbar sind, in der rechten die geschwungene Keule. Unter dem rechten Arme des Herkules strahlt ein heller St. 1. Gr., **Gemma** genannt, der hellste St. in einem Kreise ganz kleiner Sterne, den man die nördliche **Krone** nennt, in welcher 1866 ein St. hell aufblitzte. Neben der Herkulesstirne befindet sich der St. Ras-Alhague, die Stirne einer direct nach entgegengesetzter Richtung gestellten Fig., des Schlangenträgers oder Ophiuchus, der in seinen Händen die Schlange trägt, deren Kopf von der Keule des Herkules bedroht, über der Krone schwebt, und welche sich bis zu dem Adler hinwindet. Der St. δ heißt Jed oder Schlangenherz, der St. α Unuk oder Schlangenhals. Nach Aratus ist der Schlangenträger der Arzt Aeskulap, der seine Kunst von einer Schlange erhielt. Nach Ovid gehörte die von Vulkan angefertigte Krone zuerst der Venus und dann der Ariadne, nach deren Tod sie Bacchus an den Himmel versetzte. Der Schlangenträger erstreckt sich weit über den Aeq. hinaus, die Schultern stehen nahe an demselben, und der linke Fuß tritt auf den **Antares** einen Stern 1. Gr. in dem südlichen Sternbilde Skorpion.

546

b. **Sternbilder der Ekliptik.** (Fig. 356). Die Ekliptik ist die Bahn, welche die Sonne scheinbar jährlich am Himmel durchläuft. Dieselbe zieht durch 12 Sternbilder, die zusammen den **Thierkreis** oder **Zodiakus** bilden, 6 davon liegen nördlich, 6 südlich vom Aeq. des Himmels. Die nördlichen sind: Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau; die südlichen: Wage, Skorpion, Schütze, Steinbock, Wassermann, Fische.

Sunt aries, taurus, gemini, cancer, leo, virgo,
Libraque, scorpius, arcitenens, caper, amphora, pisces.

Nach Kloeden (1848) sind die Namen dieser Sternbilder in Aegypten entstanden, indem dieselben mit den durch die Nilüberschwemmungen bedingten Erscheinungen in Verbindung gebracht wurden. Zu der Zeit, als die erste genauere Kalenderordnung in Aegypten geschah, 1872 v. Chr., ging der Sirius in der Sommermitte kurz vor der Sonne auf, so daß er noch in der Morgendämmerung sichtbar war; der Tag, an dem dies zum erstenmale stattfand, wurde als der erste Tag des Jahres festgesetzt; das Sternbild, in welchem der Sirius steht, erhielt so als Wächter des Jahres den Namen der große Hund, auf dessen Erscheinen der kleine Hund vorbereitete. Zu jener Zeit nun fiel wegen der Präcession der Fixsterne der Punkt, in welchem die Sonne im Frühlingsanfange stand, in den Stier, die Sonne stand im Juli im Löwen, bei ihrem Untergange ging das gegenüberliegende Sternbild Steinbod auf. Es begann die Nilüberschwemmung, deren Steigen mit dem Steigen des Sternbildes zusammenfiel, dem man deshalb den Namen eines hoch in die Gebirge steigen-

Fig. 356



den Thieres, des Steinbocks, beilegte. Das Sternbild, das im folgenden Mon. aufging, wo die Ueberschwemmung ihre Höhe erreicht hatte, erhielt den Namen Wassermann, und das des nächsten Mon., wo der fallende Nil zahllose Fische auf dem Lande zurückließ, den Namen Fische. Auf dem morastigen Boden wuchsen üppige Kräuter, die abzuweiden die Heerden hinausgetrieben wurden; das Sternbild, das zu dieser Zeit Abends aufging, erhielt so den Namen Widder, und das des folgenden Mon., wo der fester getretene Boden mit Stieren gepflügt wurde, den Namen dieses Thieres. In dem dann beginnenden Mon., wo Alles grünte und blühte, geschahen die Heirathen; das aufgehende Sternbild sah man für ein Brautpaar an, dessen Abbildung von den es nicht verstehenden Griechen als ein Bild von Zwillingen aufgefaßt wurde. In dem nächsten Mon., unserem Januar, kehrte die Sonne von ihrer südlichsten Stellung wieder um; dieses wichtige Ereigniß brachten die Aegypter

mit dem heiligen Sonnenkäfer in Verbindung und setzten sein Bild über die neu aufgehende Sternengruppe; die Griechen hielten das Bild für einen Taschenkrebs. Die immer wachsende Sonnenkraft, die gelbe Farbe des trocknenden Landes gaben dem folgenden Sternbilde den Namen Löwe, und die in dem nächsten Mon. stattfindende Aernte erzeugte das Bild Jungfrau mit der Aehre (spica). Die dann eintretende Tag- und Nachtgleiche wurde durch die Waage bezeichnet, die böse Zeit der größten Hitze im Mai mit Skorpion und die rasch dahineilenden Regenwolken des Juni durch das Bild des Schützen dargestellt.

1. Der Widder steht in der Richtung vom Nordpole über die Cassiopeja, Andromeda und das Dreieck hinaus; ganz in der Nähe des Dreiecks steht ein ähnliches stumpfwinkliges Dreieck, gebildet von 1 St. 2 Gr. α (Elnath), 1 St. 3. Gr. β und 1 St. 4. Gr. γ oder Mesarthim, bei welchem vor 2200 J. die Sonne im Frühlingsanfange stand. Diese Sterne bezeichnen den Kopf des Widders; der Schwanz ist durch 4 kleine Sterne dargestellt. Zwischen Widder und Medusenhaupt ist das kleine Sternbild Fliege. Die Griechen sahen in jenem Sternbilde den Widder mit goldenem Vließ, der Phrixus und Helle nach Kolchis trug und zu dem Argonautenzuge Veranlassung ward. 2. Der Stier ist leicht an einer Fig. kenntlich, die wie ein geöffneter Zirkel aussieht und 1 St. 1. Gr., den röthlichen Aldebaran, enthält und den Stierkopf darstellt. Zwei gleiche in der Richtung der zwei Zirkeläste liegende St. 3. Gr. werden als die Hornspitzen des Stieres betrachtet. Am Hals hat er einen weißen Fleck, das Siebengestirn, die Glucke oder die Plejaden genannt, das 1. St. 2. Gr., die Alkyone, enthält, in deren Nähe sich nach Mädler der Schwerpunkt unseres Astralsystems befinden soll. 3. Die Zwillinge; 2 St. 2. Gr. Castor und Pollux bilden die Köpfe, eine Reihe kleiner St. Schultern und Arme, 3 ziemlich gleiche St. begrenzen den Rumpf und 4 ungleiche St. die Füße. Die Zwillinge stellten bei den Griechen die Dioskuren Castor und Pollux vor. 4. Der Krebs ist die Benennung eines ziemlich sternarmen Raumes zwischen Zwillingen und Löwe; ein Sternhaufen in der Mitte desselben heißt auch Krippe und die St. zu beiden Seiten desselben das nördliche und südliche Eselchen. Der Krebs steht dem Hercules gegenüber; denn er stellt das krebsartige Ungeheuer vor, das Juno dem Heroen nachsandte. Der sternarme Raum zwischen Krebs und Giraffe ist theils Luchs, theils Herschels Teleskop genannt worden. 5. Der Löwe ist an einer geschwungenen, aus großen und kleinen St. zusammengesetzten Linie, die Form eines römischen S nachahmend, leicht erkennbar; der St. am Ende dieser Linie wird von Manchen zur 1. Gr. gerechnet und heißt Regulus (Löwenherz); am Schwanze bilden 3 St. ein rechtw. Dreieck; der Schwanzst. β von 2. Gr. heißt Denebola. Die Sage von Herkules und dem Nemäischen Löwen. Zwischen dem Löwen und dem gr. Bären ist ein kleines Sternbild von ähnlicher Form, das kleiner Löwe genannt wurde. 6. Die Jungfrau. Gleich neben dem Dreieck des Löwen bilden 5 St. 3. Gr. ein römisches V (Virgo) mit sehr stumpfem Winkel, welche die oberen Gewandfalten der Jungfrau begrenzen. In der linken Hand trägt sie eine Aehre durch den St. 1. Gr. Spica fixirt, mit einem Palmzweige in der rechten Hand berührt sie das Haupthaar der Berenike. Eine gewundene Reihe kleiner St. bildet den unteren Saum des Gewandes. Die Deutung des Sternbildes ist sehr verschieden; Viele halten es für eine Darstellung der Ceres. 7. Die Wage. Zwei kleine St. bilden den Waghalter. 2 St. 2. Gr., Zubenelgenubi und Zubenelschemali die Wagschale und Gewichtschale; an dem ersteren hängt noch ein Lastbündel von kleinen St. Zwei sehr kl. St. unter den genannten bilden mit denselben ein Quadrat. Dies Sternbild wurde erst zu Augustus Zeiten als Sinnbild der Gerechtigkeit dieses Kaisers aus St. des Skorpions gebildet. 8. Der Skorpion ist ein prächtiges Sternbild, das im äußersten Süden im Sommer für uns sichtbar ist mit Ausnahme des, einen ziemlich regelmäßigen Kreis bildenden Schwanzes, der für uns nie aufgeht. Der Unterkörper ist von einer geraden Linie angedeutet, die 1 Stern 1. Gr., den Antares, 1 St. 3. und 1 St. 4. Gr. enthält; der Oberkörper von einem Sternwinkel, an dessen Scheitel 1 St. 2. Gr. steht; eine Scheere erstreckt sich bis zum Schlangenherz. Der Skorpion wurde nach Eratosthenes von Zeus an den Himmel versetzt, um ihn zu belohnen für seine Tapferkeit im Kampfe gegen den Orion, der zur ferneren Vermeidung des Streites um 180° von dem Skorpion entfernt wurde. 9. Der Schütze enthält nur kleine St.; in der Nähe des Skorpions stehen 4 St. 3. und 4. Gr., die Pfeil, Bogen und Kopf des Schützen bezeichnen; ein Viereck hinter denselben deutet den Körper, ein noch entfernteres den Pferdefuß an, da das Bild den Centauren Chiron vorstellen soll; ein Sternbogen schützt ihn als Schild von dem Ophiuchus. 10. Der Steinbock hat zum Kopfe 3 St. 3. Gr. in gerader Linie, zum Schwanze 4 St. 3. und 4. Gr., welche einen vom Kopfe weit entfernten Doppelwinkel bilden. Ueber dem Steinbock steht Antinous und neben diesem über dem Schützen der Schild des Sobieski, der über sich den Stier des Poniatowski hat. 11. Der Wassermann enthält ebenfalls nur kl. St.; 3 St. 3. Gr. bilden Kopf und Schulter, 2 kl. St. an der rechten Schulter die Amphora, mehrere an der linken Schulter das Ende des Tragbandes. Der Wasserguß endigt am südlichen Fisch, dessen Maul durch Fomalhaut, das Urbild der Sterne 1. Gr. angegeben ist. Der Wassermann stellt nach Manchen

den Deukalion vor. 12. Die Fische; 2 fischähnliche Fig., von denen die eine nach dem Wassermann zu liegt, die andere die Andromeda in die Seite beißt, sind durch ein Sternband verbunden. Nach Hygin hat Venus sich mit ihrem Sohne Cupido aus Furcht vor dem Riesen Typhon in Fische verwandelt, die dann an den Himmel versetzt wurden.

547 c. Südliche, bei uns sichtbare Sternbilder. 1. Die Jagd des Orion (Fig. 357). Das schönste Sternbild des ganzen Himmels ist der Orion, südlich von den Zwillingen und dem Stier stehend; 3 kl. St. bezeichnen den Kopf, 1 rother St. 1. Gr., Beteigeuze, die rechte Schulter, 1 St. 2. Gr. Bellatrix die linke, 3 in gerader Linie stehende St. 2. Gr. bilden den Gürtel des Orion oder den Jakobsstab, ein St. 1. Gr., Rigel, den linken Fuß, 2 St. 4. Gr. das Schwert. In der rechten Hand schwingt er die Keule gegen den Stier, den linken Arm, schildartig mit einem Felle bedeckt, bezeichnet ein Sternbogen. Ueber ihm droht der Stier, zur Rechten bringt das Einhorn heran, zu dessen Seite der große und der kleine Hund sich gegen den Jäger wenden. Der große Hund hat in seinem Kopfe 1 St. 1. Gr., den Sirius, den schönsten Fixst. des Himmels, und 3 kleinere St.; der Körper und eine Vorderpfote sind durch St. 2. und 3. Gr. angedeutet; auch der kleine Hund enthält 1 St. 1. Gr., den Prokyon, und 1 St. 4. Gr. Unter dem Orion bilden kleine St. den Hasen und die Taube, und links schwimmt in dem Eridanusfluß, den eine gewundene Sternenlinie bildet, der Wallfisch herbei, der zu dem Sagenkreise des Perseus gehört.

Fig. 357.



Nach Aratus war Orion ein Jäger, der sich vermaß, um die Göttin Diana zu werben und dafür durch einen von derselben gesandten Skorpion getödtet wurde. Zeus versetzte beide an den Himmel, den Orion mit 1 Hasen und 2 Hunden um einen Halbkreis vom Skorpion entfernt. Der Stier soll nach einigen alten Astronomen die Gestalt darstellen, die Zeus beim Raube der Europa annahm. Die Plejaden waren die 7 Töchter des Atlas und der Plejone; die älteste hieß Alkyone, die jüngste, Merkurs Mutter, Maja. Hygin sagt, es wären nur 6 an den Himmel gekommen, weil eine, Merope, einen Sterblichen, den Sisyphus, geheirathet habe. Der Stierkopf heißt auch die Hyaden oder die Regensterne, weil diese zur Regenzeit wieder erscheinen. — Neben dem kleinen Hunde bilden unter dem Krebs 4 kl. St. den Kopf der Wasserschlange, welche sich bis zum Skorpion hinwindet, einen St. 2. Gr. Alphard (Hyderherz) enthält und im Frühling ganz sichtbar ist; zwischen derselben und der Jungfrau stehen der Rabe, ein schönes Viereck aus 4 St. 3. Gr. gebildet, und der Becher. Sie stellen eine Sage dar, die Ovid erzählt (Anguis, avis, crater, sidera juncta micant).

548 d. Südliche unsichtbare Sternbilder. Der Centaur mit dem südlichen Kreuze steht unter dem Schwanze der Wasserschlange; der erste enthält 6 St. 3. Gr. und 1 St. 1. Gr. α Centauri nahe am Südpole, welcher dadurch von besonderem Interesse erscheint, daß er der nächste der bis jetzt berechneten Fixst. ist. Nahe bei demselben ist das südliche Kreuz, aus St. 2. Gr., einem 3. Gr. und 1 St. 1. Gr. gebildet, die ganz regelmäßig die gewöhnliche stehende Kreuzform nachbilden. Zur Zeit des Ptolemäus erhob sich der letzte, der Fußstern, in Alexandria noch 6° über den Horizont, während er jetzt dort nicht mehr aufgeht. Ganz in der Nähe des Kreuzes sind Stellen am Himmel, die viel dunkler sind als die übrigen sternenleeren Räume, Stellen, durch welche man nach Herschel aus unserem Astralsysteme in den unendlichen Weltraum hinaussieht; dieselben haben den unschönen

Namen **Kohlensäcke** erhalten. Neben dem Kreuze steht das herrliche Sternbild des Schiffes **Argo**, dessen hellster St. Canopus, dem Sirius fast gleich kommt. Nicht weit von demselben nach dem Südpole zu stehen die große und kleine **Magelhaen'sche** Wolke, zwei milchstraßenartige Lichtwolken, die aus zahlreichen kleinen St., Sternenhaufen und Nebelflecken bestehen. Bis zur kleinen Wolke nahezu zieht sich der Eridanusfluß, mit einem St. 1. Gr., **Achernar**, endigend. Die sternarmen Stellen des südl. Himmels sind zur Verewigung von astr., phys. und chem. Apparaten benutzt worden; so gibt es dort einen chem. Ofen, eine Elektrisirmasch., ein Fernrohr, einen Sextant u. s. w., die wir alle füglich übergehen.

549 **2. Scheinbare Bewegungen der Fixsterne.** a. **Die tägliche scheinbare Bewegung des Himmels.** Alle Gestirne steigen täglich im Osten herauf, erreichen einen höchsten Punkt am Himmel (obere Culmination), steigen im Westen wieder herab und erreichen einen tiefsten Punkt (untere Culmination), um im Osten wieder herauf zu steigen. Diese tägliche Drehung aller Gestirne von Osten nach Westen ist keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht durch die tägliche Rotation der Erde von Westen nach Osten. Wir können nämlich diese Rotation nicht wahrnehmen, weil wir überhaupt eine eigene Fortbewegung nur dann empfinden, wenn Stöße oder Erschütterungen mit derselben verbunden sind, oder wenn wir die nahen Gegenstände an uns vorbeigehen sehen; mit der Rotation der Erde aber sind keine Stöße und Erschütterungen verbunden, und alle Körper um uns nehmen an dieser Rotation Theil; daher ist die Rotation der Erde um die Erdachse für unsere Empfindung nicht vorhanden. Wenn man sich aber bewegt und von dieser Bewegung nichts empfindet, so scheint sich Alles außer uns in entgegengesetzter Richtung zu bewegen. So scheint sich der ganze Himmel von Osten nach Westen um die Erde zu drehen, weil sich die Erde von Westen nach Osten um sich selbst dreht. Und zwar muß sich jeder Punkt des Himmels so nach Westen zu bewegen scheinen, wie der Erdpunkt, dessen Zenit er ist, sich wirklich nach Osten zu bewegt. Demnach müssen die Himmelspunkte über dem Nord- und Südpole der Erde, der Nordpol und der Südpol des Himmels, bei der täglichen Drehung des Himmels ausschließlich in Ruhe bleiben; ganz in der Nähe des Nordpoles des Himmels steht der Schwanzstern des kleinen Bären; dieser Stern heißt der Nordpolarstern, steht sehr nahe immer an derselben Stelle, und zwar genau nach Norden zu, so daß man an ihm die sicherste Orientirung für die Weltgegenden besitzt. Wie nun die Erdpunkte in der Nähe der beiden Pole täglich kleine Kreise fast um den Erdpol beschreiben, so beschreiben auch die Sterne in der Nähe der Himmelspole ganz kleine Kreise um den betreffenden Himmelspol; die Sterne des kleinen Bären laufen täglich in kleinen Kreisen um den Nordpolarstern und gehen daher für uns nie unter. Sterne, welche diese Eigenschaft haben, werden Circumpolarsterne genannt. Wie die Parallelkreise an Größe zunehmen, je weiter die Erdpunkte von den Polen abstehen, so beschreiben auch die Gestirne täglich um so größere Kreise, je weiter sie von den Himmelspolen entfernt sind, und den größten Kreis, den Himmelsäquator, legen diejenigen Sterne täglich zurück, die gleichweit von beiden Polen abstehen. Die Tageskreise aller Gestirne sind dem Himmelsäquator sämmtlich parallel, wie die unter ihnen befindlichen Erdorte täglich parallele Kreise mit dem Erdäquator beschreiben.

Man kann sich am einfachsten eine Vorstellung von der Uebereinstimmung der Himmelskreise mit den unter ihnen befindlichen Erdkreisen verschaffen, wenn man sich in einem großen Saale ein Jahrmarktscaroussel denkt, also eine aufrechte Welle als Achse, an der in größeren und kleineren Entf. Sitze angebracht sind, während sich oben an der Decke in gleichen Entf. schwarze Punkte befinden. Denkt man sich nun in einen solchen Sitz, die Augen senkrecht nach oben an die Decke gerichtet, und die Bewegung so sanft, daß man von derselben nichts fühlt, so scheinen die Punkte in entgegengesetzter Richtung zu kreisen, und zwar scheinen sie genau eben so große Kreise zu beschreiben wie die Sitze, über denen sie angebracht sind. Der Endpunkt der Welle, der Pol, ist in Ruhe, die Punkte in der Nähe desselben beschreiben kleine Kreise, und die Kreise wachsen mit der Entf. von dem Pole, sind aber immer den Kreisen der Sitze gleich, deren Zenite sie sind. So ist auch der Himmelspol in Ruhe, jeder Himmelspunkt beschreibt täglich einen Kreis wie derjenige Erdpunkt,

dessen Zenit er ist, alle diese Himmelkreise sind einander parallel, nehmen mit dem Abstande von einem Pole zu, und die St. über dem Erdäq. beschreiben den Himmelsäq. St., die $23^1/_2{}^0$ von diesem entfernt sind, wie z. B. die des Sternbildes Krebs, legen einen Tageskreis zurück, der Wendekreis des Krebses genannt wird und sich über dem irdischen Wendekreise des Krebses befindet, woraus dessen Name erhellt. Ebenso befindet sich der Wendekreis des Steinbocks auf der Erde unter einem Himmelsparallel, den das Sternbild Steinbock, $23^1/_2{}^0$ südlich vom Himmelsäq., täglich zurücklegt.

Erscheinung der täglichen Bewegung an verschiedenen Stellen der Erde. 550
Der natürliche Horizont ist eine Ebene, die im Standpunkte die Erdkugel berührt. Was an der Himmelskugel über dem Hor. ist, ist sichtbar, was unter dem Hor. ist, unsichtbar. Der astronomische Hor. ist eine Ebene, die zum natürlichen parallel durch den Mittelpunkt der Erde geht. Für Himmelsbetrachtungen fällt der natürliche Hor. mit dem astronomischen zusammen; folglich ist der Hor. ein größter Kreis, er halbirt die Himmelskugel, die Hälfte des Himmels ist sichtbar, die andere unsichtbar. Jeder Erdpunkt hat seinen eigenen Horizont.

Fig. 358.

Im gewöhnlichen Leben bezeichnet man mit Hor. den Gesichtskreis, den Kreis, in welchem Himmel und Erde rings um uns aneinander grenzen; daß alles über demselben am Himmel Befindliche sichtbar und alles unter ihm unsichtbar ist, gibt Jedermann zu. Für die mathematische Betrachtung haben wir nur festzustellen, welche Ebene dieser Bedingung genügt. Fig. 358 zeigt, daß es die Ebene dd ist, die im Standpunkte E die Erdkugel berührt; denn damit die Himmelspunkte a, b, c sichtbar wären, müßten ihre Lichtstrahlen aE, bE, cE durch die Erdkugel gehen, was bei dem Punkte f nicht nöthig ist, da sein Licht ungehindert in das Auge des Beobachters E gelangen kann. Von unten heraufgehend, wird zuerst der Punkt d sichtbar, dessen Strahl die Erde in E berührt; also ist dd der nat. Hor. Der astr. Hor. HT fällt für Himmelsbeobachtungen mit dem nat. zusammen, weil die Erde gegen den Himmel verschwindend klein ist. Derselbe halbirt nicht blos die Himmelskugel, sondern auch jeden andern größten Kreis derselben, den Himmelsäq., die Ekliptik, die Meridiane, nicht aber die Himmelsparallelen, weil diese keine größten Kreise sind.

Durch diesen Begriff wird eine schärfere Erklärung der scheinbaren täglichen Drehung des Himmels möglich. Stellt (Fig. 359) der Punkt 1 einen Erdbewohner des Aeq. vor und der Sternbilderkreis den Himmelsäq., so ist WO der Hor. von 1, W sein Westpunkt, O sein Ostpunkt; der Orion steht in seinem Zenit, der Pegasus geht für ihn unter, der Löwe auf. Nach 3 Std. ist der Erdbewohner 1 durch die Erdrotation in 2, sein Hor. ist jetzt die punktirte Linie Wallfisch-Jungfrau; der Löwe ist jetzt um $^1/_8$ des Himmelskreises vom Hor. entfernt, er ist im Osten um $^1/_8$ des Himmels gestiegen. Nach abermals 3 Std. ist der Beobachter in 3, sein Hor. ist die Linie Orion-Ophiuchus; der Löwe ist um $^1/_4$ des Himmelskreises von diesem Hor. entfernt, er steht jetzt im Zenit. Ein weiterer Verfolg dieser Betrachtung zeigt die tägliche ostwestliche Drehung aller Gestirne um die Erde und läßt auch erkennen, daß jeder Himmelspunkt sich im Verhältnisse zu den anderen so zu drehen scheint, wie der Erdpunkt, dessen Zenit er ist, daß also die Tageskreise der Gestirne einander und dem Aeq. parallel sind und nach den Polen zu immer kleiner werden. Wir können demnach die Erscheinung der täglichen Bewegung des Himmels für jeden Erdpunkt geometrisch construiren, wenn wir die Stellung des Himmelsäq. für diesen Punkt zeichnen können, und das ist möglich, wenn die Lage der beiden Himmelspole P und P′ bekannt ist; diese aber findet man nach dem Satze:

Die Polhöhe ist gleich der geographischen Breite. Unter der Polhöhe versteht man die Bogenentfernung des Poles von dem Hor., gemessen auf dem Höhenkreise. Der Höhenkreis ist ein Kreis, der auf dem Hor. senkrecht steht, also durch den Zenit des Beobachters geht.

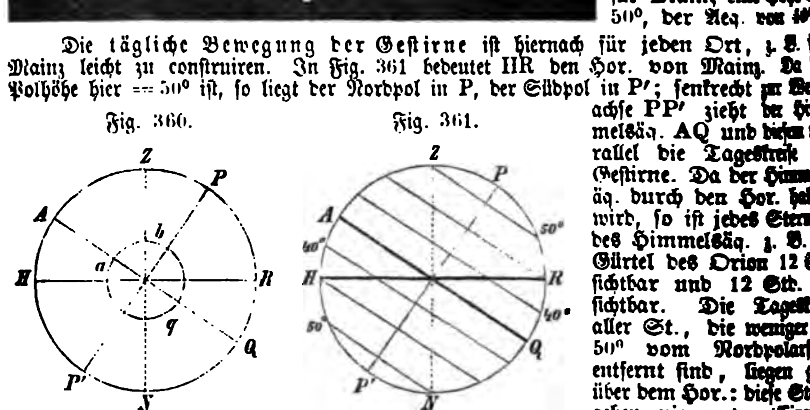
Fig. 359.



Der Beweis des Satzes ist leicht an Fig. 360 zu führen, wo b den Erdpunkt bedeutet, Z sein Zenit, PP' die Weltachse, AQ den Himmelsäq., also aq den Erdäq. und HR den Hor. des Erdpunktes b. Demnach ist die Polhöhe durch den Bogen PR und die geogr. Breite durch den Bogen ab gegeben, der ebensoviele Grade enthält als der Bogen AZ. Nun ist dieser Bogen AZ = 90° — PZ, er ist das Complement der Zenitdistanz PZ des Nordpoles P. Die Polhöhe PR ist aber ebenfalls = 90° — PZ, weil ZR = 90° ist; folglich ist die Polhöhe PR = der geogr. Br. ab. Die Aequatorhöhe AH ist analog gleich der Zenitdistanz PZ, ist also das Compl. der geogr. Breite. So hat der Nordpolarstern für Mainz eine Höhe von 50°, der Aeq. von 40°.

Die tägliche Bewegung der Gestirne ist hiernach für jeden Ort, z. B. für Mainz leicht zu construiren. In Fig. 361 bedeutet HR den Hor. von Mainz. Da die Polhöhe hier = 50° ist, so liegt der Nordpol in P, der Südpol in P'; senkrecht zur Weltachse PP' zieht der Himmelsäq. AQ und diesem parallel die Tageskreise der Gestirne. Da der Himmelsäq. durch den Hor. halbirt wird, so ist jedes Sternbild des Himmelsäq. z. B. der Gürtel des Orion 12 Std. sichtbar und 12 Std. unsichtbar. Die Tageskreise aller St., die weniger als 50° vom Nordpolarstern entfernt sind, liegen ganz über dem Hor.: diese Sterne gehen nie unter (Circumpolarsterne). Die Tageskreise aller St., die weniger als 40° nördl. vom Aeq. stehen, sind mehr über als unter dem Hor.: diese St. sind mehr als 12 Std. sichtbar und weniger als 12 Std. unsichtbar. Die Tageskreise aller St., die weniger als 40° südlich vom Aeq. stehen, sind mehr unter als über dem Hor.: diese St. sind weniger als 12 Std. sichtbar und mehr als 12 Std. unsichtbar. Die Tageskreise aller St., die weniger als 50° vom Südpole entfernt sind, liegen ganz unter dem Hor.: diese St., wie z. B. die des südl. Kreuzes, gehen nie für uns auf.

Fig. 360. Fig. 361.



Für den Nordpol der Erde gehen die Sterne des nördl. Himmels niemals unter und die des südl. Himmels niemals auf, was durch einen Blick auf Fig. 362 erklärlich ist, da

die Tageskreise der ersteren ganz über, die der letzteren ganz unter dem Hor. liegen; denn für den Nordpol der Erde ist die geogr. Br. also auch die Polhöhe = 90°, die Himmelspole P und P′ fallen mit Zenit und Nadir zusammen, also der Himmelsäq. AQ mit dem Hor. HR, wodurch die Tageskreise dem Hor. parallel werden. Für den Aeq. der Erde sind alle Gestirne 12 Std. sichtbar und 12 Std. unsichtbar; denn (Fig. 363) hier ist die geogr. Breite, also auch die Polhöhe gleich 0, die Pole P und P′ liegen im Hor. HR, und der auf der Weltachse PP′ senkrecht stehende Himmelsäq. AQ geht durch Zenit und Nadir; folglich werden sowohl dieser, wie alle ihm parallelen Tageskreise durch den Hor. halbirt.

Fig. 362.

ZP, AH, RQ, NP′

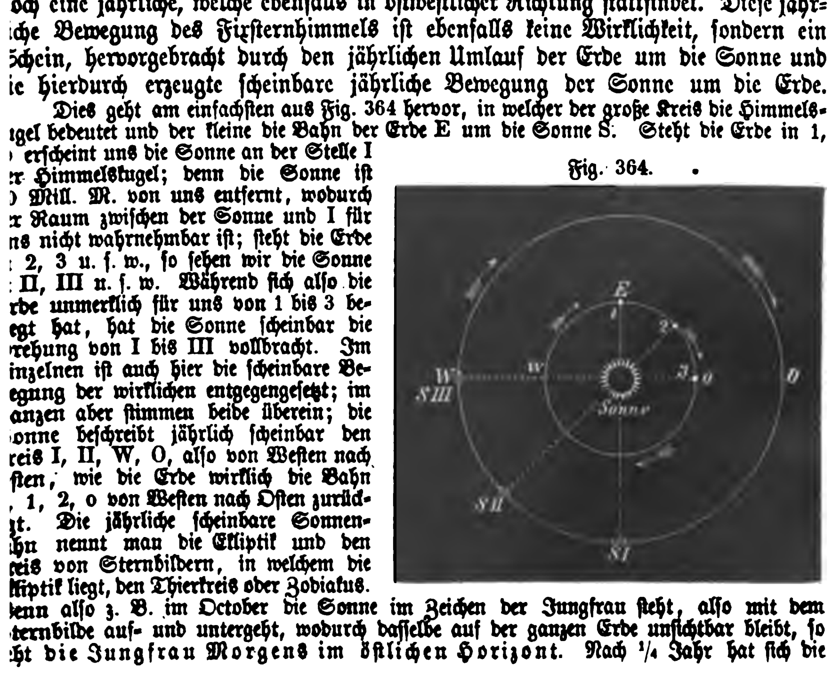
Fig. 363.

ZA, P′H, RP, NQ

b. Die jährliche scheinbare Bewegung des Himmels. Nur der Nordpol und der Südpol des Himmels behalten sowohl im Laufe jedes Tages, als auch im Verlaufe eines Jahres ihre Stellung unverändert bei; alle anderen Sterne, also auch alle Sternbilder haben in verschiedenen Zeiten des Jahres zu derselben Tageszeit eine verschiedene Stellung, an demselben Tage und zu derselben Tageszeit erreichen sie aber in verschiedenen Jahren immer wieder dieselbe Stellung; so steht z. B. das Sternbild des großen Bären um 10 Uhr Abends im April in unserem Zenit südlich vom Polarsterne, im Juni westlich von demselben, dagegen zu derselben Zeit im October nördlich vom Polarsterne nahe am Horizont und im Januar östlich von demselben. Die Sterne haben außer ihrer täglichen Drehung um die Erde noch eine jährliche, welche ebenfalls in ostwestlicher Richtung stattfindet. Diese jährliche Bewegung des Fixsternhimmels ist ebenfalls keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht durch den jährlichen Umlauf der Erde um die Sonne und die hierdurch erzeugte scheinbare jährliche Bewegung der Sonne um die Erde. 551

Dies geht am einfachsten aus Fig. 364 hervor, in welcher der große Kreis die Himmelskugel bedeutet und der kleine die Bahn der Erde E um die Sonne S. Steht die Erde in 1, so erscheint uns die Sonne an der Stelle I der Himmelskugel; denn die Sonne ist 20 Mill. M. von uns entfernt, wodurch der Raum zwischen der Sonne und I für uns nicht wahrnehmbar ist; steht die Erde in 2, 3 u. s. w., so sehen wir die Sonne in II, III u. s. w. Während sich also die Erde unmerklich für uns von 1 bis 3 bewegt hat, hat die Sonne scheinbar die Drehung von I bis III vollbracht. Im Einzelnen ist auch hier die scheinbare Bewegung der wirklichen entgegengesetzt; im Ganzen aber stimmen beide überein; die Sonne beschreibt jährlich scheinbar den Kreis I, II, W, O, also von Westen nach Osten, wie die Erde wirklich die Bahn w, 1, 2, o von Westen nach Osten zurücklegt. Die jährliche scheinbare Sonnenbahn nennt man die Ekliptik und den Kreis von Sternbildern, in welchem die Ekliptik liegt, den Thierkreis oder Zodiakus.

Fig. 364.



Wenn also z. B. im October die Sonne im Zeichen der Jungfrau steht, also mit dem Sternbilde auf- und untergeht, wodurch dasselbe auf der ganzen Erde unsichtbar bleibt, so geht die Jungfrau Morgens im östlichen Horizont. Nach 1/4 Jahr hat sich die

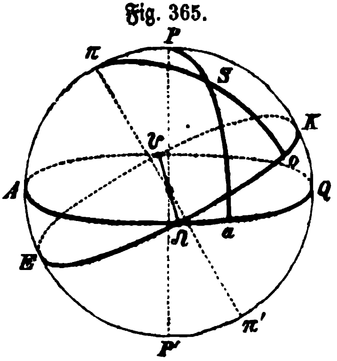
Sonne um $^1/_4$ des Himmels von dem Sternbilde nach Osten zu entfernt: die Jungfrau steht Morgens in der Mitte zwischen Osten und Westen in ihrer höchsten Stellung, war also von Mitternacht bis Morgens am Osthimmel sichtbar. Nach $^1/_2$ Jahr hat sich die Sonne um die Hälfte des Himmels von dem Sternbilde entfernt: die Jungfrau steht Morgens im westlichen Horizont, war also die ganze Nacht sichtbar. Nach $^3/_4$ Jahren hat die Sonne $^3/_4$ des Himmels nach Osten hin zurückgelegt, ist also von der Jungfrau nach Osten zu $^3/_4$, nach Westen zu $^1/_4$ des Himmels entfernt: die Jungfrau steht Morgens zwischen Westen und Osten in ihrer tiefsten Stellung, war also von Abends bis Mitternacht am Westhimmel sichtbar. Die Jungfrau und so jedes Sternbild scheint sich also jährlich von Osten nach Westen um die Erde zu drehen. Hieraus erklärt es sich, warum der Himmel in der einen Jahreszeit einen anderen Anblick bietet als in der anderen, warum die Sternbilder theilweise $^1/_2$ Jahr unsichtbar sind, sowie warum die Sternbilder, die aus Cirkumpolarsternen bestehen, zu verschiedenen Jahreszeiten eine verschiedene Stellung haben.

552 **Ortsbestimmung der Gestirne.** Um feinere scheinbare und wirkliche Bewegungen der Fixsterne wahrnehmen zu können, muß man zu jeder Zeit genau die Stelle angeben können, wo sich ein Fixstern befindet. Zu diesem Zwecke bedarf man eines festen größten Kreises der Himmelskugel und auf diesem eines festen Punktes; man denkt sich dann durch den Fixstern einen größten Kreis senkrecht zu dem festen Kreise gelegt und mißt dann sowohl den Bogenabstand des Fixsternes von dem Schnittpunkte der zwei Kreise auf dem zweiten Kreise, als auch den Bogenabstand dieses Schnittpunktes von dem festen Punkte auf dem ersten Kreise. Als feste größte Kreise, als Grundkreise sind angewendet worden der Horizont, die Ekliptik und der Himmelsäq., so daß es drei Ortsbestimmungssysteme gibt. 1. Das System des Horizontes. Der Grundkreis ist der Hor., der Anfangspunkt der Zählung liegt im Südpunkte, d. i. in dem Punkte, in welchem der Meridian des Beobachtungsortes den Hor. trifft; die Zählung geschieht nach Westen. Die durch die Sterne gedachten senkrechten Kreise, welche alle durch den Zenit als Pol des Hor. gehen, heißen Höhenkreise. Der Abstand eines Sternes vom Hor. auf seinen Höhenkreis gemessen, wird Höhe, der Abstand des Höhenkreises vom Südpunkte Azimuth genannt. 2. Das System der Ekliptik. Der Grundkreis ist die Ekliptik, ein größter Kreis, der gegen den Aeq. um $23^1/_2{}^0$ geneigt ist und denselben in zwei Punkten schneidet, die man Nachtgleichenpunkte oder Frühlingspunkt (♈) und Herbstpunkt (♎) nennt; der Anfangspunkt ist der Frühlingspunkt, die Zählung geschieht nach Osten, die durch die einzelnen Sterne gelegten senkrechten Kreise, welche sämmtlich durch den Pol der Ekliptik gehen, heißen Breitenkreise. Die Entfernung eines Sternes von der Ekliptik auf dessen Breitenkreise gemessen wird Breite, die Entfernung des Breitenkreises vom Frühlingspunkte wird Länge genannt. 3. Das System des Aequators. Der Grundkreis ist der Aeq., der Anfangspunkt ist der Frühlingspunkt, die Zählung geschieht nach Osten; die durch die einzelnen Sterne gelegten senkrechten Kreise, welche sämmtlich durch die beiden Himmelspole gehen, heißen Declinationskreise. Der Abstand eines Sternes vom Aeq. auf dessen Declinationskreise gemessen, wird Declination (+ D oder — D), die Entfernung des Declinationskreises vom Frühlingspunkte gerade Aufsteigung (Ascensio recta A. R.) genannt. Die letztere Messungsmethode ist die gebräuchlichste. Die schiefe Aufsteigung (Ascensio obliqua) ist die Entfernung eines Sternes vom Frühlingspunkte auf einem durch die beiden Punkte gelegten größten Kreise gemessen. Damit die zu messenden Winkel nicht zu groß werden, hat man von einer Reihe wohlbekannter Sterne die A. R. und D. auf das Genaueste bestimmt und benutzt diese für denselben nahe liegende Sterne als Anfangspunkte eines neuen dem Grundsysteme parallelen Systems; diese Sterne heißt man Fundamentalsterne; ihre A. R. und D. müssen zu der neuen A. R. und D. addirt oder subtrahirt werden, um die richtige A. R. und D. eines Sternes zu erhalten.

Das erste System liefert für jeden Erdpunkt andere Ortsbestimmungswerthe eines

und desselben Sternes; es ermöglicht aber die einfachsten Methoden. Man muß zuerst das Fernrohr des Theodolits in den Meridian stellen, so daß man im südlichen Hor. den Südpunkt, im nördlichen den Nordpunkt sieht; zu diesem Zwecke richtet man es auf den Polarstern. Da derselbe aber nicht ganz genau im Nordpole steht, so stellt man den Kreuzungspunkt des Fadenkreuzes auf den Polarst. ein, wenn er am weitesten rechts steht, und wenn er am weitesten links steht, und gibt dann dem Fernrohre genau die mittlere Lage; dann dreht man das Fernrohr um seine wagrechte Achse, bis es in den südlichen Hor. sieht, so hat man den Südpunkt. Nun richtet man das Fernrohr auf den zu messenden Stern und dreht es um die wagrechte Achse in den Hor., so gibt seine Drehung die Höhe an; endlich dreht man es um die senkrechte Achse bis in den Südpunkt zurück, so erhält man das Azimuth. Das 2. und 3. System sind in Fig. 365 dargestellt, AQ der Aeq., EK die Ekliptik, ☊ und ☋ der Frühlingspunkt und der Herbstpunkt, P und P′ die Pole des Aeq., π und π' die Pole der Ekliptik; πSo ist der Breitekreis des Sternes S, ☊o seine Länge l, So seine Breite b; PSa ist der Declinationskreis des Sternes S, ☊a seine A. R. = r, Sa seine D. = δ. Um die Elemente δ und r dieses Systems zu messen, benutzt man das Passage-Instrument, ein auf festem Mauerwerke um eine wagrechte Achse genau im Meridian drehbares Fernrohr mit Fadenkreuz; ob das Fernrohr wirklich im Meridian steht, erfährt man dadurch, daß die Zeit zwischen einer oberen und der darauf folgenden unteren Culmination eines Circumpolarsternes eben so groß ist als die Zeit zwischen dieser und der nächsten oberen Culmination. Ist dieses festgestellt, so mißt man die Höhe eines Circumpolarsternes sowohl bei seiner oberen als auch bei seiner unteren Culmination; dadurch erhält man die Polhöhe; denn diese ist gleich dem arithmetischen Mittel der beiden Culminationshöhen. Hieraus ergibt sich die Aequatorhöhe, da dieselbe das Complement der Polhöhe ist. Nun wartet man eine obere Culmination des zu messenden Sternes ab; dann fällt dessen Declinationskreis, sowie sein Höhenkreis in den Meridian; mißt man jetzt die Höhe des Sternes, d. i. seinen Bogenabstand vom Horiz., so hat man nur die Aequatorhöhe von dieser Culminationshöhe abzuzählen, um den Bogenabstand des Sternes vom Aeq., d. i. seine Declination δ zu erhalten. Für die Rectascension r bedarf man eines genauen Chronometers und der Rectascension eines benachbarten Fundamentalsternes. Man beobachtet die Zeit der Culmination des Fundamentalsternes und dann die Zeit der Culmination des zu messenden Sternes; liegen die 2 Sterne auf einem Declinationskreise, so culminiren sie zu gleicher Zeit, haben also auch gleiche Rectascension; steht der zu messende Stern 15° östlicher als der Fundamentalstern, so culminirt er 1 Std. später, weil die Drehung von 360° in 24 Std. vollbracht wird; man hat also nur den Unterschied der 2 Culminationszeiten mit 15 zu multipliciren, um den Unterschied der Rectascensionen zu erhalten; dieser wird zu der A. R. des Fundamentalsternes addirt, so hat man die gesuchte A. R. des Sternes. — Die Rectascension der Fundamentalsterne wird bestimmt, indem man den Unterschied ihrer Culminationszeit und der des Frühlingspunktes mit 15 multiplicirt; hierbei entsteht nur die Schwierigkeit, daß an diesem Punkte kein Stern steht, und daß er wegen der Präcession sich etwas verändert; durch folgendes Verfahren kann dieselbe umgangen werden: Man mißt an dem Tage vor und nach Frühlingsanfang die Culminationshöhe und die Culminationszeit der Sonne und in den folgenden 2 Nächten die Culminationszeit des zu messenden Fixsternes; die Zwischenzeit zwischen der Culmination des Sternes und der der Sonne wird am zweiten Tage kleiner sein als am ersten, weil die Sonne sich an dem ersten Tage nach Osten zu, dem Sterne entgegen, bewegt hat; wird diese Zeit in Std. ausgedrückt mit 15 multiplicirt, so erhält man den westöstlichen Weg der Sonne an diesem Tage. Auf diesem Wege ist sie durch den Frühlingspunkt gegangen. Die Entf. desselben von den beiden Sonnenstellungen an beiden Mittagen kann man berechnen, indem dieselben sich wie die beiden Entf. der Sonne vom Aeq. verhalten, die man leicht finden kann, wenn man von den beiden Culminationshöhen die Aequatorhöhe abzieht. Wird die nach dem Fundamentalsterne zu liegende Entf. durch 15 dividirt und zu der zweiten Zwischenzeit addirt, so hat man die Zwischenzeit zwischen der Culmination des Frühlingspunktes und des Sternes, welche mit 15 multiplicirt die A. R. ergibt. Gewöhnlich wird indeß die A. R. nicht in Graden, sondern in Stunden angegeben. — Die Declinationskreise, welche durch den Frühlingspunkt und Herbstpunkt, sowie durch den höchsten und tiefsten Punkt des Aeq. gehen, werden Koluren genannt; sie theilen den Himmel in 4 gleiche Quadranten. — Die Elemente des dritten Systems, die Länge l und Breite b eines Sternes, können aus der Decl. δ und

Fig. 365.



der A. R. $= r$ nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie berechnet werden; denn in dem Dreieck $P\pi S$ kennt man die Seite $P\pi = KQ = 23^1/_2{}^0 = \varepsilon$ (die Schiefe der Ekliptik), sodann die Seite $PS = 90 - \delta$ und den Winkel $\pi PS =$ Bogen $Aa = A☊ + ☊a = 90 + r$; gesucht ist die Seite $\pi S = 90 - b$ und der Winkel $S\pi P =$ Bogen $oK = ☊K - ☊o = 90 - l$. Nach dem Cosinussatze ist $\cos(90 - b) = \cos\varepsilon \cos(90 - \delta) + \sin\varepsilon \sin(90 - \delta) \cos(90 + r)$ oder $\sin b = \cos\varepsilon \sin\delta - \sin\varepsilon \cos\delta \sin r = \cos\varepsilon (\sin\delta - \tan\varepsilon \cos\delta \sin r)$. Setzt man nun $\tan\varepsilon \sin r = \tan\varphi$, so erhält man $\sin b = \cos\varepsilon (\sin\delta - \tan\varphi \cos\delta)$ oder $\sin b = \cos\varepsilon (\sin\delta \cos\varphi - \cos\delta \sin\varphi)/\cos\varphi = \cos\varepsilon \sin(\delta - \varphi)/\cos\varphi$. Nachdem nun b, also auch die Seite $\pi S = 90 - b$ bekannt ist, findet man den Winkel $S\pi P = 90 - l$ nach dem Sinussatze: $\sin(90 - l) : \sin(90 + r) = \sin(90 - \delta) : \sin(90 - b)$, oder $\cos l : \cos r = \cos\delta : \cos b$, woraus $\cos l = \cos r \cos\delta / \cos b$.

553 c. **Die Präcession und Nutation** (Hipparch 180 v. Chr., Bradley 1748). Die Länge aller Fixst. bleibt im Laufe der Jahre nicht dieselbe, sondern nimmt jedes Jahr um 50,221″ zu; hieraus folgt, daß auch die Rectascension und Declination der St. sich um geringe Beträge ändern müssen. Diese Veränderung aller Fixst. kann nur von einem Zurückweichen des Anfangspunktes der Zählung, von dem Zurückgehen des Frühlingspunktes herrühren. Sie erklärt sich daraus, daß die Sonne den außerkugelförmigen, äquatorialen Wulst der Erde in ihre eigene Ebene, die Ekliptik, zu drehen und dadurch die Erdachse senkrecht zur Ekliptik zu richten strebt. Wenn aber die freie Achse eines Rotationskörpers einer Kraft unterliegt, die ihre Richtung zu ändern strebt, so ändert sich dieselbe nicht, sondern beschreibt eine Kegeldrehung; so ändert auch die Erdachse ihre Richtung nicht, sondern beschreibt in 26000 Jahren eine ostwestliche Kegeldrehung um die Achse der Ekliptik. Der Nordpol beschreibt in dieser Zeit einen Kreis von $23^1/_2{}^0$ Halbmesser um den Pol der Ekliptik, der unter dem Drachenkopfe in der Nähe des Polarsternes liegt; der Himmelsäquator ändert in Folge dieser Achsenwanderung allmälig seine Lage; folglich rücken auch seine Schnittpunkte mit der Ekliptik, und dies sind ja die Nachtgleichenpunkte, allmälig auf der Ekliptik nach Westen hin, wodurch die nach Osten gezählten Längen wachsen. Näheres 150.

554 d. **Die Aberrationsellipse der Fixsterne** (Bradley 1726). Alle Fixst. beschreiben in einem Jahre kleine Ellipsen von Westen nach Osten, deren große Achsen $40^1/_2$ Sec. betragen; in der Nähe des Poles der Ekliptik, der unter dem Drachenkopfe nach dem Polarst. zu liegt, ist auch die kleine Achse sehr nahe eben so groß; dieselbe wird aber um so kleiner, je weiter die St. vom Pole der Ekliptik entfernt sind, und ist für St. der Ekliptik selbst gleich Null, so daß diese nur eine gerade Linie von 40″ Länge jährlich hin- und hergehend beschreiben. Diese Erscheinung ist keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht dadurch, daß die Geschw. der Erde gegen die des Lichtes nicht verschwindend klein ist; während ein Lichtstrahl durch das Fernrohr geht, bewegt sich die Erde fort; der Lichtstrahl würde auf die Wände des Fernrohres fallen, wenn nicht das Fernrohr eine solche schiefe Richtung erhielte, daß seine Wand während der Fortbewegung der Erde und des Fernrohres dem Lichtstrahle fortwährend ausweichen würde; diese schiefe Richtung muß nach der Seite hin stattfinden, wohin sich die Erde fortbewegt; und da wir einen St. immer in der Richtung sehen, in welcher sein Strahl unser Auge trifft, so scheint jeder St. in der Richtung verschoben, in welcher sich die Erde bewegt. Diese Verschiebung, die man die Aberration des Lichtes nennt, ist so groß, daß ihre trig. Tangente gleich der Geschw. der Erde dividirt durch die des Lichtes ist, und beträgt hiernach 20,25″; sie ist in dem einen Halbjahre nach der entgegengesetzten Seite gerichtet wie im anderen, und in beiden gleich groß, also im Ganzen $= 40^1/_2''$. Sie ist indessen nur dann ganz vorhanden, wenn die Erde eine solche Richtung hat, daß sie dem Strahle des Sternes ausweicht, wenn also die Erdrichtung und die Strahlrichtung auf einander senkrecht stehen; dies ist nur für den Pol der Ekliptik nahezu der Fall; dieser gibt daher allein ein genaues Spiegelbild der Erdbewegung in seiner Aberrationsellipse. Steht der St. in der Ebene der Ekliptik, so bewegt sich die Erde an 2 diametralen Stellen ihrer Bahn in der Richtung des Strahles, hier kann also keine Verschiebung stattfinden; die Erde geht nicht aus der Ebene der Bahn heraus, also kann auch der St. nicht aus derselben zu gehen scheinen, er muß in der Ekliptik sich hin- und herschieben; die kleine Achse derselben Aberrationsellipse ist Null. Diesen zwei äußersten Fällen nähert sich ein St. um so mehr, je näher er an der Ekliptik oder an ihrem Pole steht.

555 e. **Die jährliche Parallaxe und die Entfernung der Fixsterne** (Bessel 1837). Wenn die Bewegung der Erde um die Sonne eine Wahrheit ist, so muß ein Fixstern zu verschiedenen Jahreszeiten an verschiedenen Stellen der Himmelskugel erscheinen, ähnlich wie ein in der Mitte eines Zimmers befindlicher Gegenstand uns an verschiedenen Stellen der gegenüberliegenden Wand erscheint, wenn wir uns vor ihm hin- und herbewegen; und zwar muß, wenn die Erde in ihrem westlichsten Bahnpunkte A (Fig. 366) steht, der Stern S uns am weitesten

östlich bei s′ erscheinen, und umgekehrt am weitesten westlich bei s″, wenn die Erde ihre östlichste Stellung bei B hat. Den Bogenabstand nun der zwei äußersten Stellungen eines Sternes während eines Jahres nennt man die doppelte jährliche Parallaxe; schärfer definirt ist die Parallaxe der Winkel, unter welchem von dem Sterne aus der Halbmesser der Erdbahn erscheint; sie ist demnach der Winkel an der Spitze eines rechtwinkeligen Dreiecks ACS, dessen eine Kathede der Halbmesser der Erdbahn A C = 20 Mill. M. ist; folglich kann man mittels der Parallaxe die andere Kathede SC dieses Dreiecks, d. i. die Entfernung des Sternes bestimmen. Die Parallaxe wird um so kleiner, je weiter der Stern entfernt ist; ist die Entfernung desselben gegen den Halbmesser der Erdbahn unendlich groß; so ist die Parallaxe gleich Null; sie wird nahezu gleich Null, wenn die Entfernung gegen den Halbmesser sehr groß ist. Nun hat man nur mittels besonders künstlicher Methoden und ausgezeichneter Instrumente für mehrere Sterne Parallaxen aufgefunden, welche indessen noch nicht 1″ betragen; hieraus folgt, daß die Fixsterne eine solche Entfernung besitzen, daß selbst der Halbmesser der Erdbahn (20 Mill. M.) gegen dieselbe außerordentlich klein ist: der nächste Fixstern, α Centauri, ist 4,5 Bill. M. oder $3^1/_2$ Jahre Lichtzeit entfernt.

Fig. 366.

Die Existenz einer Himmelskugel, welche bei dieser Erklärung vorausgesetzt wird, ist allerdings nur eine Fiction zur Erleichterung der Darstellung; indessen wird durch Fixsterne, welche noch weiter als der zu messende Fixst. entfernt sind, diese Himmelskugel vorgestellt, indem man die jährliche Aenderung der Stellung des Fixst. gegen seinen Sternhintergrund ins Auge faßt. Dies ist schon deßhalb geboten, weil die parallaktische Ortsveränderung eines Fixst. viel zu gering ist, um durch ein gewöhnliches Fernrohr als Aenderung der A. R. und D. wahrgenommen werden zu können; sie läßt sich nur wahrnehmen, wenn ganz nahe bei dem St. ein zweiter sehr schwacher und demnach unendlich weit entfernter St. steht, und wenn man ein Instrument hat, durch welches die kleinsten Aenderungen der Distanz und der Positiou gemessen werden können. Ein solches Instrument besitzt die Astronomie in dem feinsten Mikrometer, dem Heliometer von Fraunhofer. In demselben ist das Objectiv so gespalten, daß 2 Bilder entstehen, welche man mittels Mikrometerschrauben und dadurch veränderter Stellung der beiden Gläser zum Decken, zur Berührung oder auch in beliebige Entf. von einander bringen kann. So mißt man z. B. den scheinbaren Durchm. der Sonne oder eines Planeten, indem mau die Bilder zuerst zum Decken, und dann zu äußerer Berührung bringt; die Größe der Drehung der Mikrometerschraube gibt ein Urtheil über die Größe der Verschiebung, welche dem scheinbaren Durchm. gleich ist. Dreht man an der Schraube des anderen Glases, bis eine zweite Deckung und dann eine abermalige Berührung stattfindet, so hat man die gesuchte Distanz multiplicirt, was man noch öfter wiederholen und so auch eine fast unmeßbare Distanz zu einer meßbaren machen und dann durch entsprechende Division genau finden kann. Dieses Heliometer hat Bessel zuerst angewendet, um für den St. 61 im Schwan sowohl die Distanz von 2 sehr nahen und sehr schwachen St.. als auch den Positionswinkel, d. i. den Winkel zu finden, den die Verbindungslinie zweier St. mit dem Declinationskreise des einen St. macht; diese Bestimmung wurde 400 mal wiederholt und hieraus die Parallaxe des St. 61 Cygni = 0,511″ gefunden. Seitdem wurden die Parallaxen von etwa 40 St. nach ähnlichen Methoden aufgesucht und daraus die Entf. berechnet; in folgender Tafel enthält die 2te Colonne die Parallaxe, die dritte die Entf. in Bill. M.

α Centauri . .	0,919″	4,5	Arcturus . . .	0,127″	32
61 Cygni . . .	0,511″	8,1	1830 Grombridge	0,118″	35
Sirius	0,193″	21	Polarstern . . .	0,076″	54
Wega	0,180″	23	Capella	0,046″	90

556 f. Das Auseinandergehen des Herkules und die Eigenbewegung unseres Sonnensystems (W. Herschel 1783, Argelander 1837). Bei den St. des Herkules und der in seiner Nähe stehenden Sternbilder zeigten die Untersuchungen von Herschel und die noch gründlicheren Argelanders, daß dieselben sich in einem Jahrhundert etwas von einander entfernt haben, während nach Galloway die St. von gegenüber liegenden südl. Sternbildern mehr zusammen gerückt sind und die zwischenliegenden Sternbilder eine solche gemeinschaftliche Aenderung nicht wahrnehmen lassen. Diese eigenthümliche, offenbar nur scheinbare Bewegung erklärt man dadurch, daß unser Sonnensystem eine eigene Bewegung hat, und daß diese nach dem Sternbilde des Herkules hin, von dem entgegengesetzten Himmelspunkte also weg gerichtet ist; wenn man sich nämlich einer Vielheit von Gegenständen nähert, so rücken dieselben mehr aus einander, während sie bei unserer Entfernung sich mehr einander zu nähern scheinen. Die Stelle, auf die unser Sonnensystem jetzt hingerichtet ist, wird von verschiedenen Forschern, die nach verschiedenen Methoden rechneten, ziemlich übereinstimmend als ein Punkt in der Nähe des St. λ Herculis angegeben.

557 **Wirkliche Bewegungen der Fixsterne.** a. Die Eigenbewegung der Fixsterne (Bradley 1755, Mädler 1855). Die Fixsterne haben außer den betrachteten scheinbaren Bewegungen auch eine eigene im Weltraume fortschreitende Bewegung, welche indessen so klein ist, daß sie für das gewöhnliche Sehen selbst in Jahrtausenden noch unmerklich bleibt, mit dem Fernrohre aber schon in einem Jahrhundert als sehr beträchtlich erkannt wird und bis zu 8″ in einem Jahre ansteigt; hiernach ist die Benennung Fixsterne nicht der Wahrheit entsprechend, und es verändert sich der Anblick des gestirnten Himmels, die Gestalt der Sternbilder in Jahrmillionen vollständig.

Der Name Bradleys bleibt, so lange menschliche Wissenschaft besteht, unauflöslich mit der Eigenbewegung der Fixst. verbunden, weil er zuerst einen Fixsternkatalog anfertigte, der die Oerter von 3222 St. enthält; zählt man von diesen Oertern die Veränderungen ab, welche von den scheinbaren Bewegungen herrühren, und vergleicht sie mit den später bestimmten Oertern, wie es Mädler ein Jahrh. nach Bradley gethan hat, so erhält man die Ortsveränderung in dieser Zeit. Dieselbe ist sehr ungleich; die hellsten, also für die nächsten gehaltenen St. zeigen zwar eine starke Eigenbewegung, z. B. Sirius 125″, Arctur 220″, allein durchaus nicht in dem Maße ihrer größeren Nähe stärker; der kleine St. ε Indi hat 771″, 61 Cygni (5. Gr.) hat 522″, ein St. im Eridanus 409″ säculare Eigenbewegung, woraus hervorgeht, daß die Geschw. dieser Bewegung bei den verschiedenen St. sehr verschieden ist. Die Zukunft wird diese Bewegung genauer kennen, da jetzt Hunderttausende von Sternörtern bestimmt sind, die eine Grundlage für künftige Vergleichungen bieten. Daß die Verschiebung der Spectrallinien benutzt worden ist, um Bewegungen der Fixst. nach uns hin und von uns weg zu erkennen und zu messen, wurde schon in 425. 4 besprochen.

558 b. Die Revolution der Doppelsterne (Christian Mayer zu Mannheim, W. Herschel 1778). Bei teleskopischer Untersuchung der dem blosen Auge einfach erscheinenden St. hat sich herausgestellt, daß ein Drittel bis ein Viertel derselben aus zwei oder mehreren eng beisammen stehenden St. besteht; die Zahl der Doppelsterne ist bei Weitem überwiegend; doch gibt es auch 3fache und 4fache Sterne; so ist Stern Mizar, auf dem man schon mit blosem Auge das Reiterchen Alkor sieht, ein 4facher Stern; σ Orionis ist nach Struve sogar ein 16facher Stern. Das Trapez im Orion, das man früher für 4fach hielt, enthält nach J. Herschel jetzt 6 St., von denen 2 allmälig zur Sichtbarkeit herangewachsen sind. Viele Doppelst. sind nur optische Doppelst., d. h. sie scheinen eng beisammen zu stehen, weil sie nahezu in derselben Gesichtslinie liegen, können aber in der Richtung derselben weit von einander entfernt sein. Die meisten Doppelst. sind physische Doppelst., d. h. sie bilden ein Sternsystem für sich, dessen Theile von einander viel weniger weit als von anderen Sternen entfernt sind; dafür spricht zunächst ihre Anzahl, die zu groß ist, um sie als Resultat des zufälligen Hintereinanderstehens ansehen zu können; dann spricht dafür die oft gemachte Beobachtung, daß die 2 St. zusammen dieselbe Eigenbewegung haben, also sich am Himmel fortbewegen, ohne ihre Zusammengehörigkeit zu verlieren; der entschiedenste Beweis liegt aber darin, daß sie sich um einander drehen, und daß die Umdrehungszeit dieselbe bleibt.



ewöhnlich ist der eine viel größere als der andere, und es dreht sich dann der leinere (der Begleiter) um den größeren (den Hauptstern); oft aber auch drehen ie sich um den zwischenliegenden Schwerpunkt. Bei dieser Revolution folgen sie en Keppler'schen Gesetzen, woraus sich die Geltung des Newton'schen Gravitations-esetzes auch für die Fixsternwelt ergibt.

Der Doppelstern ζ Herculis wurde schon 1782 als solcher von Herschel erkannt; da erselbe nur eine Umlaufzeit von 37 Jahren hat, so konnte der vollständige Umlauf schon mal beobachtet werden. Der Hauptstern ist 3. Gr. und der Begleiter 8. Gr., der erstere t gelblich, der letztere purpurroth. An diesem Doppelst. wurde zuerst die Beobachtung einer Sternbedeckung gemacht, indem bei einem Umlaufe der eine St. genau in die Gesichtslinie es anderen trat und hierdurch die beiden zu einem einfachen St. verschmolzen. Lange Zeit war von den bekannten Umlaufzeiten die von ζ Herculis die kleinste; jetzt kennt man och einen Doppelstern von 15 J. Umlaufszeit, 1037 in Struves Katalog; die St. ζ im rebs und ξ im großen Bären haben ca. 60 Jahre Umlaufzeit. Der Castor, α in den Zwillingen scheint eine Umlaufzeit von fast 1000 J. zu haben; der Abstand beider Theile eträgt jetzt 5″; die beiden St. sind 2. und 3. Gr. und grünlich schimmernd. Die Bahnen er Doppelst. sind Ellipsen von großer Excentricität von durchschnittlich 0,4; γ virginis at sogar ein Exc. von 0,9; an diesem St. hat Encke zuerst die Geltung der Keppler'schen Gesetze wahrgenommen. Interessant sind die Farben der Doppelst.; während die einfachen St. meist weiß oder höchstens gelblich und röthlich sind, kommen bei den Doppelst. auch laue und grüne St. vor, und zwar hat gewöhnlich der Begleiter diese Farben, während der Hauptstern ebenfalls meist weiß und manchmal gelb oder roth ist; demnach hat in manchen Doppelst. der Begleiter die complementäre Farbe von der des Hauptsternes. Zöllner hält ieselbe meist für eine Wirkung des Contrastes; doch kann sie auch den St. eigen sein, da uch andere Farbenpaare vorkommen; so ist in λ Widder, ε Perseus u. A. ein blauer oder other Begleiter neben einem weißen Hauptst., δ Schlange, ζ Krebs bestehen aus 2 blauen nd 2 gelben St.; in κ Argo ist der Hauptst. blau und der Begleiter dunkelroth. Außerdem aben spectralanalytische Untersuchungen von complementären Doppelst. z. B. von β Cygni Huggins 1868) ergeben, daß im Spectrum des orangefarbigen St. zahlreiche dunkle Linien as Blau und Violett schwächen, während in dem blauen Begleiter Gelb, Orange und Roth on dichten dunkeln Streifengruppen durchzogen sind; die complementären Farben sind also ier nicht subjectiv, sondern den St. eigen. Einen hübschen Anblick gewähren mehrfache St. nit verschiedenen Farben; das Trapez des Orion befindet sich neben dem Nebel des Orion, ie Idee erweckend, daß seine St. sich aus demselben gebildet hätten, worauf auch noch die Vermehrung der Vierzahl auf 6 hinweist. — Bessel fand (1844) in der Eigenbewegung des Sirius und des Prokyon solche Unregelmäßigkeiten, wie sie auch bei den Bestandtheilen der Doppelst. wegen ihrer Revolution beobachtet werden, und schloß hieraus, daß diese St. unkle Begleiter haben müßten. Peters berechnete die Elemente der Bahn des Sirius-egleiters um den Schwerpunkt des Systems und fand die Umlaufzeit = 49 J.; endlich vurde 1862 ein schwacher Stern neben dem Sirius zuerst von Clark in Boston und dann eitdem mehrfach von Anderen mit sehr guten Fernrohren gesehen; von Auwers wurde (1863) achgewiesen, daß derselbe mit dem von der Rechnung geforderten dunkeln Begleiter über-instimme, wenn dessen Masse = ½ der Siriusmasse sei; sonach ist dieser Begleiter plane-arischer Natur. Auch den dunkeln Begleiter des Prokyon fand Struve (1874) an der Stelle, ie Auwers nach der Rechnung angegeben hatte; hiernach ist Prokyon = 80, der Begleiter = 7 Sonnenmassen. — Die Doppelst. haben eine wichtige Anwendung zur Prüfung der Fernrohre; ein Fernrohr mit 2″ Objectiv muß ξ Ursae majoris zerlegen, eines von 3″ en Castor, von 5—6″ den Rigel, ein vorzügliches Fernrohr muß im Trapez des Orion St. zeigen und den Begleiter von γ Andromedae als doppelt erkennen lassen. — Die lteren Beobachter, Herschel Vater u. Sohn, Struve Vater u. Sohn hatten die Zahl der Doppelst. auf über 6000 gebracht, deren Bahnen seitdem von Bessel, Mädler, Dawes und Dembowski verfolgt wurden. In den letzten Jahren hat Burnham in Chicago mit den euen Clark'schen Fernrohren die Zahl um 1000 vermehrt und viele St. als doppelt er-annt, die in allen anderen Instrumenten einfach erscheinen, z. B. den länglichen Begleiter om Rigel.

Das Wesen der Fixsterne; das Sternsystem (Mädler 1840). Die Fixsterne 559 sind Sonnen; dies folgt daraus, daß sie trotz ihrer großen Entfernung doch noch so hell leuchten, und daß ihr Spectrum mit dem Sonnenspectrum übereinstimmt. Alle mit bloßem Auge und mit Fernrohren sichtbaren Fixsterne bilden ein zusammengehöriges Ganzes, ein Sternsystem oder Astralsystem; unser Sternsystem besteht aus einem sphäroidalen, stark abgeplatteten Sonnenhaufen, nahezu von Linsenform, und

einem Sonnenringe, der den Sonnenhaufen in der Richtung seiner größten Ausdehnung umzieht, und der uns wegen seiner großen Entfernung als ein zusammenhängender, den ganzen Himmel durchziehender, lichtwolkenartiger Streifen erscheint, den wir Milchstraße nennen. In dem Sonnenhaufen und dem Sonnenringe sind die einander nächsten einfachen Sonnen Bill. M. von einander entfernt und drehen sich wie auch die mehrfachen Sonnen um den Schwerpunkt aller Sonnen, der nach Mädler im Sternbilde der Plejaden in der Nähe des Sternes Alkyone liegt und so die Mitte des Milchstraßenringes einnimmt. Unsere Sonne steht, 573 Jahre Lichtzeit von der Alkyone entfernt, von diesem Centralpunkte aus gesehen nach Süden zu, nach der Gegend des Skorpions und des Schützen, in derjenigen Hälfte des Sonnenhaufens, die den Herbstpunkt enthält; indessen ist sie doch verhältnißmäßig nicht weit vom Centrum des Sternsystems entfernt, da der Durchmesser des Milchstraßenringes 7700 J. Lichtzeit beträgt. Die Masse unseres Sternsystems enthält nach Mädler mehr als 100 Mill. Sonnenmassen; viele Fixsterne sind größere und glänzendere Sonnen als unsere Sonne, deren Umlaufzeit um die Alkyone 22 Mill. Jahre bei einer Geschw. von 7 1/3 M. betragen soll. Newcomb spricht sich in seiner „Popular Astronomy“ gegen diese Mädler'schen Ansichten aus.

Daß die Fixst. Sonnen sind, ja oft noch mehr Leuchtkraft als unsere Sonne besitzen, ergibt eine einfache Rechnung. Der Sirius ist 14 J. L., also 900 000 mal weiter als die Sonne von uns entfernt; wäre sein Licht für uns so stark wie das Sonnenlicht, so müßte seine Leuchtkraft $900\,000^2 = 810\,000$ Mill. mal stärker als die der Sonne sein; da aber für uns sein Licht nach Wollaston nur 20 000 Mill. mal schwächer als das Sonnenlicht ist, so muß seine Leuchtkraft die der Sonne 810 000 : 20 000, also 40 mal übertreffen.

Nach den Spectraluntersuchungen von Huggins und Secchi ist das Spectrum der Fixsterne ein Absorptionsspectrum, also ein continuirliches Spectrum mit dunklen Fraunhofer'schen Linien, wie das Sonnenspectrum. Hieraus wird geschlossen, daß die Fixst. wie die Sonne weißglühende flüssige Körper, von einer Dampfhülle umgeben seien; aus den dunkeln Linien erkennt man die Stoffe dieser Dampfhülle und findet so, daß sie meist mit irdischen Stoffen übereinstimmen. Die Spectra der Fixst. sind indessen nur der Art nach einander gleich, bieten aber in der Zahl und Stellung der Linien Unterschiede, die sich jedoch nach Secchi auf 4 Typen zurückführen lassen, welche sich auch meist schon in den Farben unterscheiden. Der erste Typus kommt oft bei weißen St. wie Sirius und Wega vor; dieselben haben in allen Farben außerordentlich feine, ziemlich gleichmäßig vertheilte dunkle Linien, wodurch sich die weiße Farbe erklärt, und 4 breite dunkle Streifen, welche dem Wasserstoffsp. angehören. Die Atmosphäre dieser St. besteht also überwiegend aus Wasserstoff, es sind wahrscheinlich die größten und schwersten Sonnen, welche mit ihrer großen Schwere alle dichteren Stoffe in den Kern herabziehen. Der zweite Typus findet sich bei gelblichen St. wie Capella, Pollux, Arcturus; das Sp. derselben stimmt mit dem der Sonne überein, enthält zahlreiche starke und dunkle Linien im Roth und Blau, weniger im Gelb, wodurch die gelbe Farbe erklärlich wird. Hervorragend sind die Linien von Wasserstoff und Eisen, ja das Sp. des Aldebaran, der schon mehr röthlich den Uebergang vom 2. zum 3. Typus bildet, zeigt sogar das Vorhandensein von Quecksilber, Antimon, Tellur und Wismuth an; diese St. sind weniger groß, ihre geringere Schwerkraft läßt auch die schweren Dämpfe in die Hülle steigen, die hauptsächlich aus Wasserstoff und Eisendampf besteht. Der dritte Typus umfaßt röthliche St. wie Beteigenze, α Herculis, Mira ceti, Antares, jedoch auch farblose und veränderliche; das Sp. enthält breite, dunkle Banden, die nach d'Arrest (1874) aus eng beisammen stehenden Linien gebildet sind, welche nach dem Blau hin an Stärke zunehmen, wodurch die Banden nach dem Blau zu scharf begrenzt, nach dem Roth zu verwaschen erscheinen. Im Sp. der röthlichen Sterne sind die Banden im blauen Theile vorwiegend; diese Sonnen sind wahrscheinlich schon in niederer Gluth, haben daher dunst- und wolkenerfüllte Atmosphären. Der 4. Typus enthält rothe und veränderliche Sterne unter 6. Gr.; ihr Sp. enthält 1 rothe, 1 grüne und eine blaue Zone, welche durch dunkle Banden getrennt sind, die umgekehrt zum 3. Typus nach dem Roth zu scharf, nach dem Blau hin verwaschen erscheinen (Vogel 1874, d'Arrest 1875). Die Hälfte der untersuchten St. gehört dem 1. Typus, 2/3 der anderen Hälfte dem 2. Typus an. Seltene St. mit hellen Spectralstreifen sind später zu einem 5. Typus zusammengestellt worden.

Daß die Fixsterne ein zusammenhängendes Ganzes, ein Sternsystem bilden, ergibt sich aus folgenden Erwägungen: 1. Jeder St. schwebt frei im Weltraume unter einer großen Anzahl sehr großer Massen, welche sämmtlich anziehend wirken, was durch die Geltung der



Keppler'schen Gesetze bei den Doppelst. zweifellos geworden ist. Alle diese Anziehungen haben eine Resultante, welche nach dem Schwerpunkte aller Massen gerichtet ist und demnach dem St. eine Bewegung um diesen Schwerpunkt ertheilen muß; jeder St. wird folglich von allen übrigen bewegt, bildet mit diesen ein zusammenhängendes Ganzes. 2. Die St. zeigen eine verhältnißmäßig beträchtliche Eigenbewegung und bestätigen hierdurch diese Folgerung; diese beträchtliche Eigenbewegung kann nur durch die Anziehung einer bedeutend überwiegenden Masse entstehen; da eine solche Centralmasse nirgendwo im Fixsternraume vorhanden ist, so kann an ihrer Stelle nur die vertheilte Masse aller Fixst. genügen. 3. Die Eigenbewegung der Doppelst. ist durchschnittlich 5 mal größer als die Drehbewegung ihrer Bestandtheile; da die letztere durch die verhältnißmäßig einander sehr nahen Bestandtheile erzeugt wird, und da in der Nähe größere anziehende Massen sich nicht finden, so kann die starke Eigenbewegung nur durch die Anziehung entfernterer Massen entstanden sein, die wegen der großen Entf. auch eine sehr bedeutende Größe haben müssen, die nur durch den Complex der übrigen St. gegeben ist. 4. In vielen Nebelflecken erkennt die Astronomie sehr entfernte Sternsysteme, sogar einige von derselben Gestalt, wie sie unserem Sternsysteme zugeschrieben wird, eine Lichtwolke mit einem Lichtringe; durch diese Analogie gewinnt die Hypothese unseres Sternsystems an Wahrscheinlichkeit.

Wegen der ziemlich gleichmäßigen Vertheilung der St. in unserem Sternsysteme muß der Schwerp. in dem Mittelp. des Haufens und des Ringes liegen. Da die Milchstraße uns den Himmel nicht in zwei gleiche Theile theilt, so kann unsere Sonne nicht in der Ebene der Milchstraße stehen, sondern etwas außerhalb derselben in der größeren Hälfte, die den Herbstpunkt enthält; da außerdem der Theil der Milchstraße, der durch Stier und Orion zieht, nur einen schwachen Schimmer, der diametrale Theil im Adler und Schwan aber den stärksten Glanz besitzt, so kann die Sonne auch nicht auf der Achse des Ringes stehen, sondern südwärts nach dem Skorpion und Schützen zu; dies wird noch dadurch bekräftigt, daß in diesen Gegenden die Milchstraße getheilt, in der diametralen aber einfach ist; John Herschel und Mädler glauben nämlich, die Milchstraße bestehe ähnlich dem Saturnringe aus mehreren Sonnenringen, die aus größerer Nähe perspectivisch getrennt, in großer Entf. dagegen vereinigt erscheinen müssen. Aus dieser Lage unserer Sonne gegen den Schwerp. folgt einfach durch Umkehrung, daß dieser Schwerp. von uns aus gegen die kleinere Himmelshälfte zu in nördlicher Richtung in den Sternbildern Widder, Stier, Zwillinge oder Orion liegen müsse. Um die Lage genauer fest zu stellen, zeigte Mädler zunächst, daß in einem solchen globularen Systeme die Anziehung sich nicht im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entf., sondern direct wie die Entf. selbst verändere, und daß daher die Geschw. des Umlaufes nicht wie im Sonnensystem sich umgekehrt wie die Wurzeln der Entf., sondern wie die Entf. selbst verhalten. Demnach müsse der Schwerp. selbst in Ruhe sein und könne daher keine andere Eigenbewegung zeigen als die Abspiegelung der Sonnenbewegung, und die nach Abzug dieser Abspiegelung übrig bleibende Eigenbewegung der anderen St. müsse mit dem Abstande vom Schwerp. zunehmen. Mädler zeigt aus den Eigenbewegungen, daß diese Bedingungen am genauesten für Alkyone erfüllt sind, daß also in der Nähe derselben der Schwerpunkt unseres Systems liegt. Aus der Beobachtung, daß die Sonne und 61 Cygni mit Alkyone ein gleichschenkeliges Dreieck bilden, berechnet dann Mädler mittels der Parallaxe 0,374″ und der jährlichen Eigenbewegung 4,067″ dieses St. seine und dadurch der Sonne Geschw.; hieraus lassen sich dann die Parallaxe der Alkyone, also deren Entf., sowie die Masse und Dimensionen des ganzen Systems berechnen. — Wilhelm Herschel hatte zuerst angenommen, die Milchstraße sei die Kante von der Linsenform unseres Sternsystems; da aber alsdann ein allmäliger Uebergang von der Milchstraße zu dem übrigen System stattfinden müßte, während doch eine plötzliche Begrenzung der Milchstraße nicht zu verkennen ist, und da die Ringform in den Nebelflecken wie im Saturn sich wiederholt, so neigte sich Herschel wie sein Sohn später zur Annahme des Ringsystems.

560 **Die Sternhaufen und Nebelflecken** (W. und J. Herschel 1786—1864, Huggins 1866). Das Sternsystem besteht zwar in der größten Zahl seiner vielen Millionen Glieder aus Einzelformen, die unabhängig von einander um den Schwerp. kreisen; aber es enthält doch schon in den Doppel- und mehrfachen St. Partialsysteme, welche für sich ein kleineres Ganzes bildend als solches um den Schwerp. gehen, und so die Vermuthung erwecken, daß auch noch reichere Sonnengruppen als Partialsysteme dem Ganzen angehören könnten, welche Vermuthung man durch die Sonnenhaufen für bestätigt hält. Wie nämlich das Sternbild der Plejaden einem blöden Auge nur als Lichtnebel erscheint, sich aber für ein schärferes Auge in 6 St. auf einem Lichtgrunde auflöst, der wieder durch ein Fernrohr in eine enge Gruppe kleiner St. verwandelt wird, wie die Krippe im Krebse, das Haupthaar der Berenike, die Lichtwolke im Schwerte des Perseus bei näherem Zusehen als enge Gruppirungen einzelner St. erscheinen, so entdeckt ein schwaches Fernrohr viele Lichtwolken, die durch ein stärkeres sich in St. auflösen, so sieht das schärfere Fernrohr wieder neue Nebel, die für ein noch schärferes ebenfalls in St. zerfallen, während auch für dieses wieder neue unauflösbar schei-

nende Lichtwölkchen, Nebelflecken genannt, auftauchen. Was durch schwache Fernrohre oder mit blosem Auge als Nebel, durch ein schärferes aber in St. aufgelöst erscheint, wird als Sternhaufen bezeichnet; die Sternhaufen haben häufig Kugelgestalt, bestehen aus vielen Tausenden von dichtgedrängten St., in denen manchmal ein rother oder ein Doppelst. durch Größe hervorragt, gewöhnlich aber die Zahl der St. und die Helligkeit nach außen abnimmt; der Name Nebelflecken wird gewöhnlich den nicht aufgelösten Lichtwölkchen gegeben. Die Zahl derselben ist sehr groß; schon W. Herschel fand 2300 Nebelflecken. Die Form ist sehr verschieden; der große Nebel im Orion ist in hohem Grade unregelmäßig, zerrissen und verästelt, die Crab-Nebula im Stier sieht aus wie ein Krebs, andere sind spiralförmig um einen Mittelstern gewunden, wie der Nebel in den Jagdhunden, andere sind ringförmig um ein Mittelwölkchen gezogen, wie der Nebel in der Leier, andere haben mehrfache Ringe, andere bilden nur einen elliptischen Ring oder auch eine ganz ausgefüllte Ellipse oder Linse, ja auch Doppelnebel kommen vor. Die Begrenzung der genannten Nebel ist meist unbestimmt und verwaschen; scharf begrenzte Nebel heißen **planetarische Nebel**, weil ihr bläuliches gleichmäßiges Licht dem Planetenlichte ähnlich ist; auch diese sind kreisförmig, elliptisch, ring- und spiralförmig, haben auch manchmal hellere Lichtkerne und kommen dadurch den **Nebelsternen** nahe, in welchen ein scharf begrenzter St. von einer runden Lichtscheibe oder auch von einem verschwimmenden Lichtwölkchen umgeben ist. Die Größe der Nebelflecken geht von mehreren Graden bis zu wenigen Sec.; die größten sind die Magelhaen'schen Wolken am Südpole und der Orionnebel. Viele dieser Gebilde, die Herschel als unauflösbar angab, sind von Lord Rosse aufgelöst oder wenigstens als auflöslich bezeichnet worden. Es wurde dadurch die Vermuthung nahe gelegt, alle Nebel seien auflöslich, wenn nur die Vergrößerung der Fernrohre hinreichend sei, sie seien meistens Sternsysteme, die weit außerhalb unseres Sternsystems demselben ähnliche Weltinseln darstellen dürften, während man die Sternhaufen für Partialsysteme erklärte, die innerhalb unseres Sternsystems wie die einfachen und Doppelst. um den Schwerp. kreisen; nur die planetarischen Nebel und die Nebelst. hielt man zwar auch für Glieder unseres Sternsystems, aber für wirkliche Nebelmassen, die im Begriffe seien, sich zu Sonnen zu verdichten. Diese Vermuthungen wurden im Allgemeinen durch die Spectraluntersuchungen von Huggins bestätigt; die Sternhaufen, die aufgelösten und die von Rosse als auflöslich (resolvable but not resolved) bezeichneten Nebel haben sämmtlich continuirliche Spectra, bestehen also aus Sonnen, von 11 nicht auflösbar genannten Nebeln hatten 6 ein continuirliches, 4 ein Streifenspectrum, die planetarischen Nebel dagegen sämmtlich Streifenspectra, wodurch die letzteren als leuchtende Gasmassen, und zwar der Hauptsache nach als Stickstoff und Wasserstoff erkannt wurden; aber auch manche nicht planetarischen Nebel wie der große Nebel im Schwertgriff des Orion haben Streifenspectra, sind also ebenfalls leuchtende Gasmassen, welche sich zu St. condensiren; so macht das Trapez im Orion den Eindruck, als ob sich die Nebelmasse von ihm zurückgezogen habe; früher sah man in dem Trapez nur 4 Sterne, während man jetzt 2 mehr sieht, welche nach der Meinung einiger Forscher sich inzwischen gebildet hätten. Auch in Herschels Dumb-bell-Nebel konnte man solche Aenderungen erkennen; denn während er nach Herschel die Gestalt von 2 Balancirkugeln oder Handeln hatte, ist nach Rosse keine Aehnlichkeit mit dieser Form mehr zu sehen. Der Andromeda-Nebel, der mit scharfen Augen ohne Fernrohr sichtbar ist, hatte nach Marius die Gestalt eines durch ein Hornblättchen scheinenden Lichtes, während Bond, der den Fleck auflöste, in demselben zwei schwarze Linien wahrnahm. Von Bewegungen konnte an diesen unbestimmten Gebilden noch nichts beobachtet werden. Die südliche Halbkugel enthält weniger aber gleichmäßig vertheilte Nebel, die nördliche mehr aber in einzelne Nebelregionen zusammengedrängt; die Nebelregion im Flügel der Jungfrau enthält 1/3 aller Nebel. Die 2 Magelhaen'schen Wolken am Südpole enthalten Sternhaufen, auflösliche und nicht auflösliche dicht gedrängte Nebel, einfache und vielfache St.; die große Wolke hat allein 300 Nebel aufzuweisen.

561 Aufg. 826. Die A. R. und D. zweier St. seien bezüglich r und r', δ und δ'; wie groß ist ihre Bogendistanz? Ant.: Die Distanz ist die 3. Seite eines sphärischen Dreiecks, dessen 2 andere Seiten $90 - \delta$ und $90 - \delta'$ den Winkel $r - r'$ einschließen. Berechnet man nun nach Vorschrift der sphärischen Trigonometrie $\cotg \varphi = \cotg \delta \cos (r - r')$, so ergibt sich für die Distanz d der Ausdruck $\cos d = \sin \delta \cos (\delta' - \varphi) / \sin \varphi$. — A. 827. Die D. eines St. sei δ, die A. R. in Stunden ausgedrückt $= r$; wie groß ist zur Zeit t (t Std. nach Mittag) die Höhe h und das Azimuth a? Aufl.: Ist $\cotg \varphi = \cotg \delta \cos (r - t)$, so ist $\sin h = \sin \delta \cos (\alpha - \varphi) / \sin \varphi$ und $\sin a = \cos \delta \sin (r - t) / \cos h$, worin α die geogr. Br. oder Polhöhe des betreffenden Ortes bedeutet. — A. 828. Aus der Länge l und Breite b eines St. seine A. R. und D. zu berechnen? Aufl.: Ist ε die Schiefe der Ekliptik und $\tg \varphi = \tg \varepsilon \sin l$, so ist $\sin \delta = \cos \varepsilon \sin (b + \varphi) / \cos \varphi$ und $\cos r = \cos l \cos b / \cos \delta$. — A. 829. Aus der A. R. und D. und der Schiefe der Ekliptik die Länge und Breite zu finden? Aufl.: Ist $\tg \varphi = \tg \varepsilon \sin r$, so ist $\sin b = \cos \varepsilon \sin (\delta - \varphi) / \cos \varphi$ und $\cos l = \cos r \cos \delta / \cos b$. — A. 830. Aus der Höhe h, dem Azimuth a eines St. und der

Beobachtungszeit die A. R. und D. desselben zu bestimmen? Aufl.: Ist $\cot\varphi = \cot h \cos a$, so ist $\sin\delta = \sin h \cos(\alpha - \varphi) / \sin\varphi$ und $\sin(r - t) = \cos a \cos h / \cos\delta$. — A. 831. Nach wieviel Jahren wird der Nordpol im Sterne Wega stehen? Aufl.: 12000 J. — A. 832. Nach wieviel J. ist der Frühlingspunkt, der jetzt in den Fischen liegt, 110° weiter westlich im Antares? Aufl.: 7800 J. — A. 833. Als man sich überzeugt hatte, daß die Parallaxe keines Fixsternes 1″ erreiche, was stand alsdann über deren Entf. fest? Aufl.: Daß sie größer sei als 206265 Erdweiten oder 4 Bill. M. — A. 834. Wie groß wäre die Entf. eines St., dessen Parallaxe = 0,01″? Aufl.: 20,6 Mill. Erdweiten oder 309 J. Lichtzeit. — A. 835. Zu beweisen, daß die Anziehungen im Inneren einer anziehenden Kugel, also eines globularen Systems sich direct wie die Entf. verhalten. And.: Sind die Entf. zweier Massen m und m′ vom Mittelpunkte = D und d, so verhalten sich die Anziehungen K und k = $(m / D^2) : (m' / d^2)$, weil die Anziehungen außerhalb dieser Massen sich neutralisiren; da nun $m : m' = D^3 : d^3$, so ergibt sich $K : k = D : d$. — A. 836. Als Mädler zuerst seine Berechnung der Massen unseres Sternensystems = 186 Mill. Sonnenmassen veröffentlichte, erhob man dagegen Einsprache, weil man nach den damaligen Sternzählungen oder Sternaichungen eine übergroße Masse für die einzelnen Sonnen hätte annehmen müssen; was könnte man nach Littrows Zählung einwenden? Aufl.: Eine zu kleine Masse der Sonnen.

Das Sonnensystem. Um unsere Sonne drehen sich 8 große Planeten mit **562** etwa 20 Nebenplaneten, mehr als 240 kleine Planeten oder Planetoiden, zahlreiche Kometen und zahllose ganz kleine Weltkörper oder Asteroiden, sowohl einzeln als in größeren Schwärmen oder ganzen Ringen. Die Ursache dieser Drehung liegt in der lebendigen Kraft sämmtlicher Weltkörper, vermöge welcher sie nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen würden, und in der Anziehung der Sonne, vermöge welcher sie fortwährend von der geraden Linie abgelenkt und so um die Sonne bewegt werden. Die Masse der Sonne übersteigt nämlich 800 fach die Masse aller oben genannten Weltkörper; ihre Anziehung ist daher so überwiegend, daß der Mittelpunkt der verschiedenen Anziehungen in die Sonne fällt, und daß sonach die Drehung um die Sonne stattfinden muß. Die Gesetze dieser Drehungen sind die Keppler'schen Gesetze, die schon in 142. betrachtet wurden.

Das moderne Weltsystem lautet nach dem Vorausgehenden: die Nebenplaneten drehen sich in Ellipsen um die Hauptplaneten, die Hauptplaneten in Ellipsen um die Sonnen, und die Sonnen um den Schwerpunkt aller Sonnen im Sternbilde der Plejaden. Dieses System ist nur eine weitere Ausbildung des Copernikanischen Systems (1543), welches lehrte, daß die Nebenplaneten um die Hauptplaneten und diese um unsere Sonne kreisen, welche in Ruhe den Mittelpunkt des Systems einnehme. Diesem System entgegengesetzt hatte das Ptolemäische System (150 n. Chr.) den Inhalt, daß die Erde den ruhenden Mittelpunkt bilde, daß um diese zunächst der Mond, dann Mercur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn, jeder Weltkörper sich in einer eigenen Sphäre drehe, welche von einer 8ten Sphäre, dem Fixsternhimmel, umschlossen sei. Das moderne Weltsystem unterscheidet sich nur darin von dem Copernikanischen, daß es durch Keppler die Ellipse als Bahnform an die Stelle des Kreises setzte, daß es auch der Sonne mit allen anderen Sonnen unseres Sternsystems eine Bewegung um den Schwerpunkt desselben zuschreibt, ja sogar eine Drehung aller Sternsysteme um den Schwerpunkt des Weltganzen vermuthet.

Unterschiede zwischen Planeten und Fixsternen. Da die Fixsterne und Planeten dem gewöhnlichen Blicke als nahezu gleiche Sterne erscheinen, so ist es angezeigt, die Unterschiede hervorzuheben. 1. Die Fixst. haben zitterndes Licht, die Pl. ruhiges Licht. 2. Die F. behalten ihre gegenseitige Stellung nahezu bei, die P. wandern zwischen den F. hin und her. 3. Die F. erscheinen durch ein Fernrohr nur als leuchtende Punkte, die P. als leuchtende Kreisscheiben. 4. Die F. sind Sonnen, d. h. sie haben Licht und Wärme durch sich selbst; die P. aber sind dunkle, kalte Körper und erhalten Licht und Wärme von den Sonnen. 5. Die F. sind Kugeln meist von mehr als 200000 M. Durchmesser, während die P., wenigstens die um unsere Sonne kreisenden, nur bis zu 20000 M. Durchm. gehen; eine Ausnahme ist bis jetzt in dem Begleiter des Sirius bekannt. 6. Die F. gehen um den Schwerpunkt aller Sonnen, die P. um die Sonnen. 7. Die Bewegung der F. geschieht mit einer Geschw. von 6—12 M., die der P. mit 6 bis 2/3 M. Geschw.

Unterschiede zwischen Planeten und Kometen. Die P. und K. stimmen darin überein, daß sie nach gleichen Gesetzen um die Sonne laufen; es ist daher auch hier das Hervorheben der Unterschiede zweckmäßig. 1. Die P. erscheinen uns als kleine St., die K. treten nur selten in der gewöhnlich angenommenen Form eines sternartigen Kernes mit Nebelhülle oder Bart und Schweif auf, sondern meist in der Form von teleskopischen Licht-

wölkchen. 2. Die P. gehen von Westen nach Osten um die Sonne, die K. auch von Osten nach Westen. 3. Die P. erscheinen für das Fernrohr als dichte, undurchsichtige Scheiben, die K. aber sind durchsichtige, verwaschene Massen von unbestimmter, wechselnder Form. 4. Die P. sind kalte, dunkle, feste Kugeln, die K. Ansammlungen von verhältnißmäßig weit aus einander stehenden kleinen Körpern, in Bart und Schweif aus Dunst. 5. Die P. erreichen höchstens einen Dm. v. 20000 M., die K. nehmen oft Mill. von M. am Himmel ein. 6. Die P. haben einen dichten, festen Stoff, die K. einen so lockeren Stoff, daß nicht blos durch Bart und Schweif, sondern sogar durch den Kern hindurch kleine St. gesehen werden können. 7. Die P. haben eine sehr große Masse, die Erde von 7 Quadrillionen kg; die K. haben kleine Massen, manchmal vielleicht von wenigen Centnern. 8. Die P. üben daher einen stark störenden Einfluß auf die K. aus, verändern die Bahnen derselben oftmals sehr stark, ja zehren dieselben allmälig auf, während die K. selbst an kleinen Trabanten der Pl. keine Veränderung hervorbringen können, wenn sie auch ganz nahe an denselben vorbeigehen. 9. Die Bahnen der P. sind stark kreisähnliche Ellipsen, die der K. lang gestreckte Ellipsen, sogar Parabeln und Hyperbeln. 10. Die P. entfernen sich daher nicht sehr weit von der Sonne, die K. aber gehen in ungeheure Fernen von der Sonne, ja mögen wohl manchmal aus dem Unendlichen (von einer anderen Sonne her) in unser Sonnensystem herein kommen, um die Sonne gehen und auf der anderen Seite wieder ins Unendliche hinaus schweifen. 11. Die Geschw. der P. in ihrer Bahn ist deßhalb nahezu dieselbe, die Geschw. der K. aber sehr verschieden, steigt im Perihel bis auf 60 M. und mag im Aphel bis auf kleine Bruchtheile von 1 M. herab gehen. 12. Die P. sind immer sichtbar, die K. aber nur selten und zwar, wenn sie in die Sonnennähe kommen. 13. Die P. wandeln sehr langsam, die K. rasch zwischen den Fixsternen hin und her.

Die Entstehung unseres Sonnensystems. Kant und Laplace setzen einen gleichmäßig in dem Raume des Sonnensystems vertheilten Urnebel voraus; da den Mol. der Luftarten fortschreitende Bewegung zugeschrieben werden muß oder denselben immanent ist, und da die etwa verschiedenen Richtungen und Geschw. derselben sich allmälig ausgleichen mußten, so erhielt hierdurch die ganze Masse eine fortschreitende Bewegung. Bei diesen Bewegungsausgleichungen mußten aber auch Massentheilchen zusammentreffen, sich einander festhalten und dadurch einen Kern bilden, der durch Anziehung immer mehr Mol. an sich sammelte und so die ganze Masse zu einer flüssigen Kugel verdichtete, welche eben durch die Verdichtung eine außerordentlich hohe Temp. erhielt und sich trotz derselben unter dem hohen Drucke der jedenfalls ungeheuren Atmosphäre flüssig erhalten konnte. Durch das Strömen der Theilchen nach dem Kerne zu mußten dieselben auch auf einander treffen und sich so in eine rotirende Bewegung um den Mittelpunkt versetzen. Es entstand also ein flüssiger Ball von großen Dimensionen und großer Hitze, der in dem kalten Weltraume durch Strahlung Wärme verlor und sich dadurch zusammenzog; hierdurch wurde die Drehungsgeschw. größer, weil die dem Mittelpunkte näher rückenden Massen ihre größere Geschw. dorthin trugen. Durch diese schnelle Drehung, genauer gesagt, durch die gleich bleibende Geschw. bei kleinerem Krümmungsradius wurde aber die Centrifugalkraft größer und konnte endlich so groß werden, daß sich Massen an dem Aeq. der großen Kugel loslösten, und sich in derselben Richtung wie das Ganze um dieses und um sich selbst drehten. Ein Nachahmungsversuch dieser Weltbildungshypothese ist die Plateau'sche Kugel (s. 152.). Aus dieser Theorie erklärt es sich, warum sämmtliche P. mit ihren Trabanten von Westen nach Osten um die Sonne und um sich selbst gehen, in derselben Richtung, in der die Sonne um sich selbst rotirt, warum alle diese Weltkörper ihre Bahnen in dem Gürtel des Thierkreises, nicht weit von dem Sonnenäq., vollenden, warum die größten Massen, die großen äußeren P. weniger dicht sind als die kleineren inneren, indem jene zur Zeit geringerer Verdichtung sich schon loslösten, und warum diese großen P. noch selbstleuchtend, also wahrscheinlich noch glühend sind, indem dieselben sich noch nicht ganz abkühlen konnten; endlich erklärt sich die hohe Temp. des ursprünglichen Ganzen, unserer Sonne, und die Fortdauer derselben, indem die Zusammenziehung immer noch stattfindet. Man hält es für keinen Widerspruch, daß viele Kometen und Asteroiden rückläufig sind, d. i. von Osten nach Westen um die Sonne gehen, und daß sie auch alle nur denkbaren Winkel in der Lage ihrer Bahnen gegen die Ekliptik darbieten, indem man annimmt, daß diese Weltkörper erst später aus dem Weltraume in unser Sonnensystem hineingekommen sind.

3. Die Sonne.

563 **Entfernung und Dimensionen der Sonne.** Die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde beträgt nach den vorläufigen Ergebnissen des Venusdurchganges vom 8. Dec. 1874 in runder Zahl 20 Mill. M.; dieselbe wurde bestimmt



mittels der Horizontalparallaxe der Sonne. Die Horizontalparallaxe eines Gestirnes ist der Winkel, unter welchem von dem Gestirne aus derjenige Halbmesser der Erde erscheint, für dessen Oberflächenpunkt das Gestirn im Aufgange begriffen ist; sie ist daher ein Winkel in einem rechtwinkeligen Dreiecke, dessen Gegenkathete der Halbmesser der Erde und dessen Hypotenuse die gesuchte Entfernung ist, welche demnach aus der Horizontalparallaxe und dem Erdhalbmesser nach den Regeln der Geometrie berechnet werden kann. Der wahrscheinliche Werth der Parallaxe ist 8,88″; aus diesem ergibt sich die erwähnte Entfernung der Sonne. Wenn diese einmal bekannt ist, so kann auch der Durchmesser der Sonne berechnet werden; der mittlere scheinbare Durchmesser der Sonne ist nämlich nach Messungen mit dem Heliometer = 32′; die Hälfte desselben ist ein Winkel eines rechtwinkeligen Dreiecks, dessen anliegende Kathete die Entfernung und dessen Gegenkathete der Radius der Sonne ist, der somit leicht gefunden werden kann. So findet man den Durchmesser der Sonne = 188 000 M., woraus das Volumen der Sonne sich gleich 1 1/4 Mill. Erdinhalten ergibt. Mit der Entfernung von der Sonne kennt man auch die Bahn der Erde und kann daraus berechnen, um wieviel die Erde in jeder Sec. durch die Anziehung der Sonne von der geraden Linie abgelenkt wird, wodurch man ein Maß für die Anziehung der Sonne gewinnt; da man in ähnlicher Weise durch die Bahn des Mondes ein Maß für die Anziehung der Erde (77.) erhalten kann, so bietet sich durch Vergleichung der beiden Anziehungen ein Mittel, die Masse der Sonne = 325 000 Erdmassen zu finden. Aus dieser Zahl und Größe der Sonne ergibt sich dann die Schwerkraft der Sonne als die 27 fache der Erde, und die Dichte der Sonne = 1/4 der Erddichte. Die Sonne dreht sich nach Spörer in 25 T. 5 St. 38 Min. um sich selbst und nach Mädler in 22 Mill. Jahren um den Schwerpunkt unseres Sternsystems.

Die Horizontalparallaxe der S. könnte man bestimmen, wenn man von dem Orte der Erde, für welchen die Sonne aufgeht oder im Horizont erscheint, (woraus sich auch der Name erklärt) und von dem Orte, für welchen die Sonne im Zenit steht, die Stellung eines und desselben Punktes der Sonne auf dem Himmelshintergrunde beobachten könnte; aus dem Bogenabstande dieser beiden Stellungen ergäbe sich dann die Horizontalparallaxe. Allein dies ist nicht möglich, weil der Himmelshintergrund hierbei von der Sonne beleuchtet ist und so keinen Anhaltspunkt bietet, und weil außerdem feste Punkte an der Sonne, die von verschiedenen Erdorten aus sichtbar wären, nicht existiren. Solche Punkte werden aber markirt, wenn die Venus zwischen uns und der Sonne vorbeigeht, weil bei einem solchen Durchgange der Planet uns als dunkler Kreis auf der großen leuchtenden Sonnenscheibe erscheint; und die zu beobachtenden Punkte sind der Berührungspunkt der Venus und der Sonne von außen und von innen beim Anfange, und von innen und von außen beim Ende der Passage. Werden diese Punkte von verschiedenen Orten der Erde nach Zeit und Ort genau bestimmt, so kann man daraus die Horizontalparallaxe berechnen. Nur sind leider die Venuspassagen sehr selten, kommen etwa alle 100 Jahre 2 mal rasch nach einander vor, und die viel häufigeren Mercurdurchgänge geben wegen der großen Entf. des Mercur von der Erde nur ein ungenaues Resultat; der drittletzte Venusdurchgang geschah 1769; aus dem Resultate der Beobachtung desselben berechnete Encke 1825 die Parallaxe der Sonne = 8,57″ und hieraus die mittlere Entf. = 20²/₃ Mill. M. Aber in den letzten Jahrzehnten wurde eine ganze Reihe von Thatsachen gefunden, welche die Parallaxe als zu klein erscheinen lassen. 1. So wiederholte Powalky mit Berücksichtigung anderer, genauerer Zahlen die Rechnung Enckes und fand 8,86 Sec. 2. Die alten Bestimmungen der Geschw. des Lichtes benutzten die alte mittlere Entf. der Sonne = 20²/₃ Mill. M. und ergaben so die Geschw. 42 000 M.; ist nun diese Entf. kleiner, so muß auch die Geschw. des Lichtes kleiner sein; und umgekehrt, wenn die Geschw. des Lichtes durch andere Mittel als zu groß erkannt wird, so muß auch jene Entf. zu groß sein. Nun aber hat die feine Methode Foucaults (1862) und die von Cornu verbesserte Methode Fizeaus (286.) nur 40 000 M. Geschw. ergeben; folglich muß auch die Entf. der Sonne kleiner sein. 3. Kennt man die Entf. eines Pl. von der Sonne, so kann man nach dem 3. Keppler'schen Gesetze auch die der Erde finden; nun bot aber die Opposition des Mars im Jahre 1862 ein Mittel, die Entf. des Mars genau zu bestimmen; aus dieser fand dann Winnecke 8,964″ für die Parallaxe der Sonne, während die genauere Resultate ermöglichende Opposition der Flora (1873) nach Galle 8,88″

ergab. 4. Da die Sonne anziehend auch auf den Mond wirkt, so muß sie die Mondbahn verändern; wenn der Mond zwischen Sonne und Erde steht, so muß sie ihn mehr von der Erde entfernen, und wenn die Erde zwischen Sonne und Mond steht, so muß sie ihn der Erde mehr nähern als gewöhnlich. Dieser Unterschied, den man die Evection nennt, hängt offenbar von der Entf. der Sonne ab und wird aus derselben vorher berechnet; da er nicht genau so eintrifft, wie er berechnet wurde, so folgt daraus, daß die Entf. nicht ganz richtig ist, die man nun umgekehrt aus der beobachteten Evection berechnen kann; Hansen fand hieraus 8,916″ für die Parallaxe. 5. Der Mond bildet mit der Erde im Verhältnisse zur Sonne ein Ganzes, dessen Schwerp. 642 M. vom Centrum der Erde entfernt ist, welcher Schwerp. eigentlich die Ekliptik beschreibt; da nun der Mond nicht in, sondern bald dies-, bald jenseits der Ekliptik steht, so muß auch das Centrum der Erde bald jen-, bald diesseits der Ekliptik liegen, oder die Sonne muß bald nördlich, bald südlich von der Ekliptik zu stehen scheinen. Da auch diese anziehende Wirkung von der Entf. der Sonne abhängt, so konnte Leverrier aus der scheinbaren Abweichung der Sonne von der Ekliptik die Parallaxe der Sonne berechnen und fand für dieselbe 8,95″. 6. Leverrier berechnet aus Störungen der Venus und des Mars Parallaxen von 8,85, 8,86 und 8,87. Die größte Wahrscheinlichkeit hat bis jetzt die Zahl 8,88″, wodurch die bisher angenommene mittlere Entf. der Sonne $20^2/_3$ M. M. sich auf 20 M. M. reducirt. Da aus dieser alle anderen Maße der Sonne berechnet werden, so müssen dieselben sich auch sämmtlich verändern; die oben angegebenen Zahlen entsprechen dem wahrscheinlichsten Werthe. Aber nicht blos diese Zahlen, sondern auch die meisten anderen Zahlen unseres Sonnensystems ändern sich, da bei ihrer Berechnung immer die Entf. der Sonne zu Grunde liegt; deßhalb wurden von allen civilisirten Nationen seit vielen Jahren Vorbereitungen für die Beobachtung der Venusdurchgänge von 1874 und 1882 getroffen, großartige Expeditionen in die entlegensten Gegenden unternommen und auf mehr als 60 Stationen beobachtet; demnach haben wir wohl bald eine Entscheidung über die genaue Entf. der Sonne zu erwarten.

Die Masse und die Schwerkraft der Sonne haben wir in Aufg. 99 und 100 bestimmt. Die Dichtigkeit der Sonne folgt einfach daraus, daß das Volumen der Sonne 1¼ Mill., die Masse der Sonne aber nur 325 000 mal so groß als bei der Erde ist. Die Umdrehungszeit der Sonne ergibt sich aus der Beobachtung der Sonnenflecken; diese gehören zu der Beschreibung der Sonne.

564 **Beschreibung der Sonne.** Die Sonne, die Quelle aller Kraft auf Erden (36.), strahlt jährlich 3000 Quintillionen Calorien aus, eine Wärmemenge, welche einen 36^m dicken Eishimmel vom Radius der Sonnenentfernung zu schmelzen vermöchte; hieraus folgt schon, daß auf der Sonne eine überaus hohe Temperatur herrschen muß. Da außerdem die Sonne ein Absorptionsspectrum hat, so ist sie nach den Gesetzen der Spectralanalyse ein weißglühender flüssiger Körper, der von einer Gashülle umgeben ist. Aus der Beschaffenheit der dunkeln Spectrallinien folgt, daß in dieser Gashülle Wasserstoff und Eisendampf die Hauptgemengtheile bilden, daß aber noch eine größere Menge anderer Körper, welche wir auf Erden kaum flüssig kennen, in Gasform der Sonnenhülle angehören. Hieraus ergibt sich für die Sonne eine Temperatur von vielen Tausenden von Graden, (nach Zöllner 100 000°), welche sich (nach Helmholtz) durch Zusammenziehung der Sonne und (nach Mayer) durch Einsturz von Asteroiden noch in unübersehbare Zeiten zu erhalten fähig ist. Die Atmosphäre der Sonne muß kühler sein als der Sonnenkern und muß mit wachsender Entfernung von demselben an Temperatur abnehmen, weil im Weltraume, der die Sonne umgibt, eine Kälte von wenigstens 200° herrscht; hierdurch wird Veranlassung zu chemischen Verbindungen, die nach Devilles Dissociationstheorie in der heißen Tiefe nicht möglich sind, und zu Condensationen geboten, wodurch Sonnenwolken entstehen, die uns als dunkle Sonnenflecken erscheinen. In der Nähe der Flecken, wie auch in anderen Gegenden der Sonnenscheibe tauchen häufig hellere Stellen auf, die man Sonnenfackeln nennt, während am Rande rothglühende Gassäulen, die Protuberanzen, oft viele Tausende von Meilen in die Höhe schießen, die wohl mit den Sonnenfackeln identisch sind. Die Zahl der Sonnenflecken erreicht alle 11 Jahre ein Maximum und sinkt in der Zwischenzeit zu einem Minimum herab (Schwabe 1838); dieselbe Periode macht sich auch geltend in der Mächtigkeit der Lichtentwickelung, der Sonnenfackeln (Weber in Peckeloh 1868), sowie



merkwürdigerweise in der täglichen Variation der Magnetnadel (Lamont 1857) und der Intensität des Erdmagnetismus, in der Häufigkeit und Intensität der Perturbationen der Magnetnadel (Sabine 1852) und in der Häufigkeit der Nordlichter (Fritz 1862); sie kommt an Länge dem Jahre des Jupiter gleich.

Die Sonnenflecken wurden 1611 von Fabricius entdeckt. Sie erscheinen als verhältnißmäßig dunkle, mehr braune als schwarze Stellen auf der leuchtenden Sonnenscheibe, an Form mannigfaltig, rund, länglich, gezackt, zerrissen, durch ein gewöhnliches Fernrohr scharf begrenzt, durch ein sehr gutes mit verwaschenen Grenzen, an Größe sehr verschieden, von 30 000 M. D. bis zu verschwindender Kleinheit, die größten am seltensten, die kleinsten oder Sonnenporen in unzähliger Menge. Die größeren Flecken finden sich hauptsächlich in 10 bis 40° Breite, in den sogenannten Fleckenzonen, seltener am Aeq., fast gar nicht an den Polen. Während die blassen Sonnenporen sich rasch verändern und verschwinden, haben die größeren Flecken einen längeren Bestand, ziehen während dessen von Osten nach Westen über die Sonnenscheibe in ca. 13 Tagen hin und tauchen nach abermals 13 T. wieder am östlichen Rande auf, woraus schon die ersten Beobachter eine Rotation der Sonne in 25 T. schlossen. Schwabe beobachtete 1840 einen Flecken während 8 Umläufen, und sah 1861—62 eine Fleckengruppe 22 mal wiederkehren. Die größeren Flecken haben häufig einen dunkleren Kern, der von einem weniger dunkeln Hofe, der Penumbra, umgeben ist, an dessen Grenzen zahlreiche Sonnenfackeln bemerkt werden. Am östl. Sonnenrande, wo die Flecken lang und schmal in die meridianale Richtung gezogen auftauchen, ist der nachfolgende Hoftheil breiter als der vorausgehende, in der Mitte der Sonnenscheibe, wo die Flecken am breitesten erscheinen, haben beide Hofseiten eine mehr gleiche Ausdehnung, während am westl. Rande der vorausgehende Hoftheil größer ist. Daraus ergab sich die Herschel-Wilson'sche Hypothese über das Wesen der Sonne; nach dieser sollte die Sonne einen dunkeln Kern, auf diesem eine graue Wolkenhülle und um diese eine mächtige Lichthülle, die Photosphäre besitzen; die Sonnenflecken dachte man sich als trichterförmige Oeffnungen in den beiden Hüllen, durch welche man auf eine Stelle des dunkeln Sonnenkernes sehe, woraus sich der Fleckenkern bilde, während der Hof durch den bloßgelegten Theil der Wolkenhülle entstehe. Gegen diese Ansicht, welche jetzt noch einige Anhänger zählt, führte Kirchhoff (1860) zunächst das physikalische Bedenken auf, daß eine solche Photosphäre vermöge ihrer gewaltig erwärmenden Kraft jede Wolkenhülle und jeden dunkeln Kern in Gluth versetzen müsse; noch weniger aber entspricht sie den Gesetzen der Spectralanalyse. Nach diesen kann ein Absorptionssp. nur entstehen durch einen glühenden von einer Dampfhülle umgebenen Körper; folglich muß die Sonne einen glühenden statt eines dunkeln Kernes und eine Dampfatmosphäre haben, deren Bestandtheile aus den Fraunhofer'schen Linien zu erkennen sind. Die Sonnenflecken sind nach dieser Ansicht Sonnenwolken; in den Raum über einer solchen Wolke kann die Sonnenhitze nur in beschränkterem Maße gelangen, weßhalb sich über der ersten eine zweite größere und dünnere Wolke bilden muß, welche die erwähnten Hoferscheinungen ausreichend erklärt; diese Ansicht wird dadurch gestützt, daß nach Huggins und Secchi die Flecken genau dasselbe Sp. wie die Sonnenfläche, nur mit breiteren Linien, haben, und daß Secchi auf das Vorhandensein von Wasserdampf bei den Flecken schließt, sowie auch durch die lebhafte Veränderlichkeit der meisten Flecken und die Eigenbewegungen derselben, welche ähnlichen Gesetzen wie die irdischen Winde zu gehorchen scheinen. Die Flecken in der Nähe des Aeq. brauchen nur 24, die entfernteren 26 Tage für ihren Umlauf; die ersteren befinden sich in einem Westwinde, die letzteren in einem Ostwinde; außerdem wandert die ganze Fleckenbildung in 11 J. von den Polen zum Aeq., gleichzeitig mit der Fackelentwickelung. Hiermit hängt die Fleckenperiode zusammen; die Zahl der Flecken ändert sich im Laufe der Jahre und erreicht alle 11 Jahre ein Max. und nicht ganz in der Mitte dieses Zeitraumes ein Min.; so fand Schwabe 1843 nur 34 Fleckengruppen und 149 fleckenfreie Tage, 1847 dagegen 400 Flecken und nicht einen freien Tag. Wolf in Zürich hat die Periode für fast 300 J. nachgewiesen und die Schwankungen derselben untersucht.

Die Protuberanzen sah man anfänglich nur als berg- und wolkenartige, rosenfarbige Hervorragungen bei Sonnenfinsternissen; spectralanalytisch untersucht wurden sie zuerst bei der großen indisch-arabischen Sonnenfinsterniß vom 18. Aug. 1868 und ergaben sich hierbei als glühende Wasserstoffsäulen, da man die hauptsächlichsten Linien des Wasserstoffs, $H\alpha$, $H\beta$ und $H\gamma$ in ihrem Sp. wahrnahm; damals gelang es indeß Janssen auch, dieses Sp. bei gewöhnlichem Sonnenscheine zu sehen nach einer Methode, die kurz vorher Lockyer vorgeschlagen hatte. Wenn man nämlich im Spektroskop eine größere Anzahl stark brechender Prismen anbringt, so wird das contin. Sonnensp. selbst so vergrößert, daß die einzelnen Theile desselben ihre blendende Kraft verlieren; wird daher der Spalt des App. senkrecht den Sonnenrand durchschneidend gestellt, so liefert der auf die Sonnenscheibe gerichtete Theil desselben ein schwaches Sonnensp. und der andere das Liniensp. der jenseits des Sonnenrandes etwa vorhandenen glühenden Gase. Durch Anwendung dieser Methode

fand Secchi, daß rings um die Sonne herum eine Hülle von glühendem Wasserstoff vorhanden ist, die in der Fleckenregion fast die Höhe von 1′ = 6600 M. erreicht, in den übrigen aber nur 1000 M. ca. hoch ist und von Lockyer Chromosphäre genannt wurde. Schiebt man das Spectroskop rasch hin und her und faßt eine von den Wasserstofflinien z. B. die rothe Hα ins Auge, so sieht man wegen der Dauer des Lichteindruckes die Grenzen der Chromosphäre, da die rothe Linie immer nur bis zu dieser Grenze vorhanden ist, und übersieht ebenso die Gestalt einer Protuberanz, wenn das Spectroskop auf eine solche gerichtet ist. Dasselbe Ziel erreichte Huggins durch Einfügung eines Rubinglases in den Apparat, weil durch dieses alle übrigen Strahlen außer denen von Hα absorbirt werden; er suchte eine Stelle des Sonnenrandes, wo sich diese Linie zeigte, und öffnete dann den Spalt weit, wodurch dieselbe sich verbreiterte bis zur Gestalt der Protuberanz. Statt des Rubins wandte Zöllner zur Abschwächung des Nebenlichtes eine größere Prismenzahl an und das weite Oeffnen des Spaltes; da gelang es ihm, die Protuberanzen bei vollem Sonnenscheine in ihrer ganzen Gestalt, Größe und Wandelbarkeit zu erkennen. So hat man denn durch die Beobachtungen zahlreicher Forscher, hauptsächlich von Lockyer und Zöllner erfahren, daß die Protuberanzen glühende Wasserstoffеruptionen sind, die bis zu vielen Tausenden von M. in den verschiedensten und wandelbarsten Gestalten aus der Chromosphäre in die Höhe schießen, zerreißen, verzweigen, sich verdünnen, von Stürmen hin und her gepeitscht werden und sich in die Atmosphäre verlieren. Anfänglich hatte man nur die Linien des H in denselben und der Chromosphäre wahrgenommen; bei der Anwendung besserer Apparate bemerkte man auch die Linien von Mg, Fe, Na u. s. w., jedoch kürzer als die H-Streifen, woraus man schloß, daß die Dämpfe jener schwereren Stoffe sich vorwiegend in den tieferen Schichten der Chromosphäre aufhielten. Als Young ein hoch gelegenes Observatorium mit reiner Luft benutzte, fand er immer mehr Linien, so daß schon 1872 die Zahl derselben auf 273 gestiegen war; die Chromosphäre ist daher ein glühendes Gas- und Dampfgemenge. Eine besondere Merkwürdigkeit derselben ist die gelbe Linie D_3, neben den Na-Linien D_1 und D_2 gelegen, jedoch von diesen dadurch verschieden, daß ihre dunkle Umkehrung im Sonnensp. fehlt; sie heißt Helium-Linie, da sie nur im Sonnensp. vorkommt. Ob die Umkehrung der Fraunhofer'schen Linien schon in der Chromosphäre stattfinde, kann noch nicht entschieden geschlossen werden; sie könnte auch noch in der übrigen Atmosphäre der Sonne geschehen. Von einer solchen sieht man bei gewöhnlichem Sonnenscheine wegen des blendenden Glanzes der Sonne nichts; bei totalen Sonnenfinsternissen aber beobachtete man schon seit alter Zeit um die dunkle Mondscheibe herum außer den Protuberanzen einen hellen Lichtkranz, die Corona. Dieselbe enthält polarisirtes Licht, leuchtet also durch das von ihr reflectirte Sonnenlicht; die Spectraluntersuchung zeigt jedoch auch das Selbstleuchten derselben an, da die meisten Untersuchungen außer einem cont. Sp. eine grüne Linie, zwischen D und E gelegen, die Linie 1474 K., ergaben, dieselbe Linie, welche auch im Sp. des Nord- und des Zodiakallichtes gefunden wurde; wahrscheinlich ist die Corona der obere Theil der Sonnenatmosphäre; jedoch wird sie auch für eine Wolkenhülle von um die Sonne kreisenden Meteoriten gehalten. — Wir sind noch weit davon entfernt, die sämmtlichen Flecken- und Fackelerscheinungen in ihrem Zusammenhange mit dem Erdmagnetismus und den Nordlichtern zu durchschauen; in meiner Schrift „die Sonne“ (1869) ist der Versuch gemacht, diesen Zusammenhang zu entwickeln; hiernach entstünden die Flecken in einer Schicht, welche kühl genug ist, um chemische Verbindungen zu erlauben, dadurch, daß die Protuberanzen Eisendampf und Wasserstoff in dieselbe bringen, welche sich mit dem O dieser Schicht zu Eisenoxydhydrat verbinden und so Rostwolken, Sonnenflecken, erzeugen. Da die Rosttheilchen schwerer als Gase und Dämpfe sind, so muß die Rostwolke in das Innere der Sonne versinken und sich durch seitliches Einströmen der Dämpfe in den verdünnten Wirbelraum immer neu bilden; die eingestürzte Masse aber wird durch die Hitze des Sonnenkörpers zersetzt und durch den gewaltigen Auftrieb desselben hoch emporgeschleudert, wodurch die hohen Protuberanzen entstehen. Die ungeheuren herabstürzenden Eisenmassen der Rostwolken müssen auf den Erdmagnetismus und dadurch auf die Nordlichter wirken; die Periodicität aller dieser Erscheinungen wird aus der Sonnennähe und Sonnenferne des Jupiter abgeleitet (457.).

565 **Die scheinbaren Bewegungen der Sonne und die Zeit.** Vermöge der täglichen Rotation der Erde um sich selbst von Westen nach Osten hat die Sonne wie alle Gestirne eine scheinbare tägliche Bewegung von Osten nach Westen um die Erde; diese bringt den Unterschied von Tag und Nacht hervor (Sterntag, wahrer Sonnentag, mittlerer Sonnentag s. 14.). Vermöge der jährlichen Revolution der Erde von Westen nach Osten um die Sonne hat diese eine scheinbare jährliche Bewegung von Westen nach Osten um die Erde, welche den Unterschied der Zonen, Klimate, Jahreszeiten und Tageslängen bedingt. Die scheinbare Bahn der Sonne

im Thierkreise, die Projection der Erdbahn auf die Himmelskugel ist die Ekliptik: ihre Ebene, die mit der Ebene der Erdbahn zusammenfällt, macht mit dem Himmelsäquator einen Winkel von 23½°, den man die Schiefe der Ekliptik nennt, und die beiden Punkte, in denen sie den Aequator durchschneidet, sind der Frühlingspunkt und Herbstpunkt. Die Zeit, in welcher die Sonne 360° zurücklegt, also wieder zu denselben Sternen des Himmels zurückkehrt, nennt man das siderische Jahr; seine Länge ist 365,25 637 mittlere Sonnentage oder 365 T. 6 St. 9 Min. 10,7496 Sec. Da der Frühlingspunkt wegen der Präcession der Sonne von Ost nach West jährlich um 50″ entgegengerückt, so ist die Sonne schon früher im Frühlingspunkte als am Ende ihrer Drehung; die Zeit zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt ist das tropische Jahr = 365,24 222 T. = 365 T. 5 St. 48 M. 46,8 Sec.; dasselbe ist die Grundlage des bürgerlichen Jahres, da von ihm die Wiederkehr der Jahreszeiten abhängt.

Wegen der großen Entf. der Sonne von der Erde haben alle Erdpunkte Tag, welche von Linien getroffen werden, die parallel zur Verbindungslinie der Mittelp. von Erde und Sonne gezogen sind; die Parallelen, welche hierbei die Erde berühren, bilden die Grenze zwischen der beleuchteten Tagesseite und der dunkeln Nachtseite; da diese Grenze ein größter Kreis ist, so hat die eine Hälfte der Erde Tag, die andere Nacht. Dieser Kreis, die Lichtgrenze, steht auf der Verbindungslinie der beiden Centra senkrecht und enthält die sämmtlichen Punkte, für welche die Sonne auf- und untergeht; er geht in 24 St. um die ganze Erde von Osten nach Westen, langt daher für je 15° weiter westlich gelegene Orte um 1 St. später an, weßhalb Auf- und Untergang der Sonne für je 15° weiter westlich gelegene Orte 1 St. später stattfinden; dasselbe gilt für den wahren Mittag; diesen haben alle Orte gleichzeitig, die auf dem Meridian liegen, der durch den Punkt geht, in welchem die Verbindungslinie der Centra die Erdoberfläche trifft, weil dieser Meridian auf der Lichtgrenze senkrecht steht und daher die beleuchtete Kugelhälfte halbirt; für jenen Schnittp. fallen die Strahlen um Mittag senkrecht auf die Erdoberfläche, weil die Sonne in seinem Zenit steht.

Da die Ekliptik mit dem Aeq. einen Winkel von 23½° macht, und da die Sonne sich jeden Tag nur parallel zum Aeq. dreht, so entfernt sie sich niemals weit vom Aeq.; ihre Strahlen fallen daher immer nahezu senkrecht auf die äquatorialen Gegenden, schiefer auf die Mittelgegenden zwischen Aeq. und Polen und sehr schief auf die polaren Gegenden; hieraus folgt der Unterschied der Zonen; denn die Wirkung der Sonnenstrahlen ist proportional dem Sinus des Neigungswinkels, nimmt also nach den Polen zu stark ab. Die äquatoriale Lage der Ekliptik ist also die Ursache des Unterschiedes der Zonen. Die eine Hälfte der Ekliptik liegt südlich, die andere nördlich vom Aeq.; auf der Seite, wo sich die Sonne von Süden nach Norden bewegt, durchschneidet sie am 21. März den Aeq. An diesem Tage ist ihr Tageskreis der Aeq.; da dieser von jedem Hor. halbirt wird, so ist die Sonne 12 St. über und 12 St. unter dem Hor., Tag und Nacht sind gleich lang. Nach dieser Zeit erhebt sich die Sonne nach Norden, ihre Strahlen fallen mehr senkrecht auf die nördlichen Gegenden, es wird für diese Frühling und Sommer; daher heißt jener Punkt der Frühlingspunkt, und die Stellung der Sonne in demselben das Frühlingsäquinoctium. Nachdem nun die Sonne auf ihrer jährlichen Bahn am 21. Juni die nördlichste Stelle erreicht hat, biegt sie wieder um nach Süden und erreicht am 23. Sept. abermals den Aeq., durchschneidet denselben im Herbstpunkte, befindet sich im Herbstäquinoctium. In der ganzen Zeit vom 21. März bis 23. Sept. steht die Sonne nördlich vom Aeq. und erhebt sich bis über ¼ der Himmelshöhe nach dem Nordpole zu; ihre Strahlen fallen daher auf die ganze nördliche Erdhälfte viel weniger schief als auf die südliche, die nördliche Erdhälfte hat Sommer, die südliche Winter; in der Zeit vom 23. Sept. bis 21. März steht dagegen die Sonne südlich vom Aeq. und entfernt sich bis zum 21. Dec. um 23½° nach Süden von demselben; ihre Strahlen fallen daher auf die nördliche Erdhälfte viel schiefer als auf die südliche, die nördliche Erdhälte hat Winter, die südliche Sommer. Die Schiefe der Ekliptik ist also die Ursache des Unterschiedes der Jahreszeiten. Wo zwei Kreise sich schneiden, weichen die Richtungen der einzelnen Elemente beider Kreise am stärksten von einander ab; an den Stellen aber, die am weitesten von den Schnittpunkten entfernt sind, sind diese Elemente einander fast parallel. Zur Zeit der Aequinoctien bewegt sich daher die Sonne jeden Tag merklich rasch zum und vom Aeq.; in den Zeiten der höchsten und tiefsten Stellung dagegen entfernt und nähert sie sich demselben während mehrerer Tage kaum merklich; daher heißt die Sonnenstellung vom 21. Juni Sommersonnenstillstand oder Sommersolstitium und die vom 21. Dec. Wintersolstitium. Indessen ist die tägliche Voranbewegung der Sonne in ihrer jährlichen Bahn gegen den Tages-

kreis selbst gering, so daß man die tägliche Bewegung als einen Parallelkreis des Himmels auffassen kann; die Sonne beschreibt also jährlich 365 Parallelkreise; der nördlichste heißt Wendekreis des Krebses, der südlichste Wendekreis des Steinbocks, weil in der Zeit nach vollbrachter Beschreibung dieser Kreise die Sonne sich nicht mehr weiter vom Aeq. entfernt, sondern sich zu demselben zurückwendet, und weil sie dabei in den betreffenden Sternbildern steht. Die Schiefe der Ekliptik ist auch die Ursache des Unterschiedes der Tageslängen. Wie der Aeq. auf seinem Hor. senkrecht steht, so stehen auch sämmtliche Sonnenkreise auf dem Hor. eines Aequatorpunktes senkrecht und haben ihre Mittelpunkte wie der Aeq. auf demselben, werden also von demselben halbirt; für den Aeq. sind daher immer Tag und Nacht gleich. Für andere Orte sind nur am 21. März und 23. Sept. Tag und Nacht gleich, weil nur der Aeq. von jedem anderen Hor. halbirt wird, während jeder andere Tageskreis von einem gegen den Aeq. schiefen Hor. in ungleiche Tag- und Nachtzeiten getheilt wird. Die Tageskreise nördlich vom Aeq. fallen um so mehr über den Hor., je kleiner der Winkel zwischen Hor. u. Aeq. ist, je weiter also der betreffende Ort nach Norden liegt, und je nördlicher die Tageskreise liegen; der Tag wird also um so länger, je weiter nördlich die Orte liegen, und je näher die Sonne dem Sommersolstitium kommt; je weiter nördlich aber ein Ort liegt, um so größere Theile der südlichen Tageskreise fallen unter den Hor., und zwar größere für südlichere; die Wintertage sind also um so kürzer, je nördlicher die Orte liegen und je näher die Sonne dem Wintersolstitium kommt. Für einen Punkt, der $23^1/_2{}^\circ$ vom Nordpole entfernt ist, also für einen Punkt des Polarkreises, weicht der Hor. $23^1/_2{}^\circ$ vom Aeq. ab, berührt also mit seinem nördliche Ende den Wendekreis des Krebses und mit seinem südlichen Ende den Wendekreis des Steinbocks; der erste liegt ganz über, der letzte ganz unter dem Hor.; der nördliche Polarkreis hat am 21. Juni 24 St. Tag und am 21. Dec. 24 St. Nacht. Für den Nordpol fällt der Hor. in den Aeq., sämmtliche nördliche Tageskreise liegen daher über, sämmtliche südliche Tageskreise unter dem Hor.; der Nordpol hat also im Sommer $^1/_2$ Jahr Tag, im Winter $^1/_2$ Jahr Nacht. Die Punkte zwischen dem Nordpole und dem Polarkreise haben eine längste Nacht zwischen $^1/_2$ Jahr und 24 St., und zwar kommt sie der ersteren um so näher, je näher der Ort am Pole liegt. Durch einen Blick auf Fig. 367, die man sich für die einzelnen Fälle nachzeichnet, wird der Unterschied der Tageslängen deutlicher; aq ist der Aeq., die ihm parallelen Linien sind die Tageskreise; aq ist auch der Hor. der Pole n und s, hr der Hor. des nördlichen Polarkreises po, h'r' der eines Punktes m der gemäßigten Zone z. B. Mainz, pp' der des nördlichen Wendekreises hk, ns der des Aeq. aq. Durch diese Horizonte werden immer die Tagesparallelen in 2 Theile getheilt, aus deren Größe leicht der Unterschied zwischen Tag- und Nachtlänge erlesen wird. Genauer gibt dies die sphärische Astr., da dieselbe Ort und Zeit des Sonnenaufgangs bis auf Sec. richtig berechnet. Dazu ist die Decl. der Sonne nothwendig, die in Fig. 368 durch $SD = \delta$, wie die A. R. durch $☊D = r$ dargestellt ist; in dem rechtw. sphär. Dreieck S☊D ist $\sin\delta = \sin l \sin \varepsilon$ und $\tang r = \tang l \cos \varepsilon$, da der Winkel bei ☊ die Schiefe der Ekl. ε und die Hyp. ☊S die Länge der Sonne $= l$ ist. Nun wird der Ort des Sonnenaufgangs bestimmt durch den Punkt S (Fig. 369), in welchem die Sonne durch den Hor. HR geht, also durch den Bogen RS zwischen der aufgehenden Sonne S und dem Nordpunkt R. Die Zeit des Aufgangs wird durch den Stundenwinkel SPR bestimmt, um welchen sich der Declinationskreis PSP' beim Aufgange seit Mitternacht gedreht hat: denn um Mitternacht steht die Sonne in der nördl. Hälfte des Meridians ZPRN, ihr Declinationskreis fällt in den Meridian, dreht sich bis Mittag in die südl. Hälfte desselben und in 24 St. völlig herum, wodurch diese Drehung durch Division mit 15 die Zeit ergibt. Für den Aufgangsbogen und den Stundenwinkel ist aber in dem sph. Dreieck SPR

$$\cos RS = \cos PS / \cos PR \text{ und } \cos SPR = \tang PR / \tang PS.$$

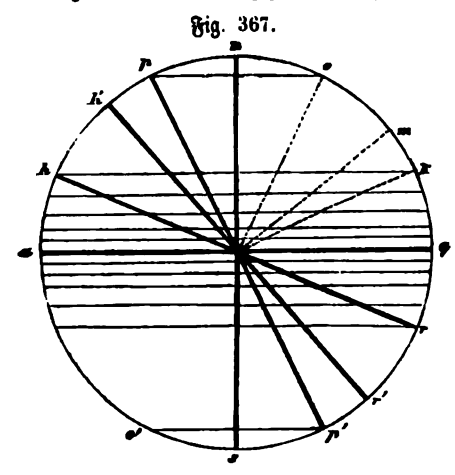


Fig. 367.

In diesen Fln. stecken die obigen allgemeinen Sätze über die Tageslängen in versch. Zonen und Jahreszeiten; außerdem lassen sich aber Ort und Zeit des Aufgangs für jeden beliebigen Jahrestag finden, wenn man die D. der Sonne kennt. Am längsten Tage ist z. B. $\delta = 23^1/_2{}^\circ$,

also ist PS = 90 — δ = 66½; für Mainz ist PR die Polhöhe = 50°, also ist cos RS = cos 66½/cos 50, woraus RS = 51°, d. h. am 21. Juni geht die Sonne in Mainz 51° vom Nordpunkte entfernt auf. Dann ist cos SPS = tang 50/tang 66½, woraus SPR = 58°; also ist die Aufgangszeit 58 / 15 = 3 13/15 = 3 St. 52 Min. nach Mitternacht, und die Tageslänge 16 St. 16 Min. Mittels des schiefw. sph. Dreiecks läßt sich auch der Einfluß der Strahlenbrechung und der Beginn der Dämmerung berechnen.

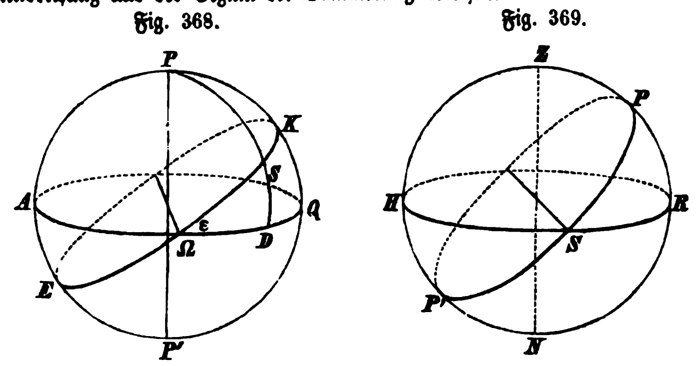


Fig. 368. Fig. 369.

Sommer und Winter sind nicht genau gleich lang; der Sommer ist für die nördliche Erdhälfte nahezu 8 Tage länger als der Winter. Dies rührt daher, daß die Erde im Sommer in ihrem Aphel ist und sich daher im Sommer langsammer bewegt als im Winter (nach dem zweiten Keppler'schen Gesetze); daher braucht die Sonne zur Zurücklegung von 180° der Ekliptik im Sommer mehr Zeit als im Winter. — Die Zonen pflegt man durch die Wendekreise und Polarkreise zu begrenzen. — Ein vorzügliches Lehrmittel für den Unterricht in der astronomischen Geographie bilden die Apparate von Adolf Mang in Baden-Baden, besonders der zerlegbare Universalapparat, da mit demselben nicht blos die Folgen der scheinbaren Sonnenbewegung, sondern auch die meisten anderen astr. Erscheinungen demonstrirt werden können.

4. Die Planeten.

Gemeinsame Eigenschaften. Um die Sonne drehen sich 8 große Pl.: Mercur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, und zwischen Mars und Jupiter mehr als 240 kleine Pl. oder Planetoiden. Ihre drehende Bewegung um die Sonne entsteht dadurch, daß sie eine gewisse fortschreitende Bewegung, eine leb. Kft. besitzen, vermöge welcher sie nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen müßten, wenn sie nicht durch die Anziehung der Sonne stetig von dieser geraden Linie abgelenkt und dadurch in eine geschlossene Bahn gedrängt würden. Diese Anziehung erfolgt nach Newtons Gravitationsgesetz in geradem Verhältnisse zu den Massen und in umgekehrtem Verhältnisse zu den Quadraten der Entf. Aus diesem Grundgesetze läßt sich schließen, daß die Planetenbewegung nach den Keppler'schen Gesetzen geschieht: 1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennp. die Sonne steht. 2. Die Radienvectoren beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume. 3. Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Cuben der halben großen Bahnachsen (Näheres 141.—150.). 566

Vermöge der elliptischen Bahn eines Planeten ist die Entfernung desselben von der Sonne verschieden; der Punkt der kleinsten Entfernung von der Sonne wird Perihel, der der größten Aphel genannt; die Verbindungslinie beider Punkte ist die große Achse der Ellipse und heißt auch Apsidenlinie. Verlängert man dieselbe über das Perihel bis an die Himmelskugel und legt durch den Endpunkt einen Breitenkreis, so ist der Bogenabstand desselben vom Frühlingspunkte nach Osten zu gemessen die Länge des Perihels. Die Planetenbahnen fallen nicht alle in eine Ebene, weichen aber doch nicht stark von der Ebene der Erdbahn, von der Ekliptik ab; der Winkel, den die Ebene einer Bahn mit der Ekliptik bildet, heißt die Neigung der Planetenbahn. Die Neigungen der Planetenbahnen liegen zwischen 1° und 7°, die der Planetoidenbahnen zwischen 40′ und 35°. Jede Planetenbahn schneidet die Ekliptik in zwei Punkten, Knoten genannt, deren

Verbindungslinie Knotenlinie heißt; der Knoten, durch welchen der Planet von Süden nach Norden geht, heißt der aufsteigende Knoten, und dessen Bogenabstand vom Frühlingspunkte nach Osten zu gemessen *die Länge des aufsteigenden Knotens*. Den Abstand des Brennpunktes der Ellipse vom Mittelpunkte nennt man die lineare Excentricität, den Quotienten derselben durch die halbe große Achse kurzweg *Excentricität*. Die Exc. der Planetenbahnen liegen zwischen 0,2 und 0,007, die der Planetoidenbahnen gehen bis $^3/_5$. Alle Größen, die man auffinden muß, um die Bahn eines Planeten vollständig zu kennen, nennt man die *Elemente der Planetenbahn*; diese sind: 1. Die halbe große Achse der Bahn. 2. Die Excentricität. 3. Die Länge des Perihels. 4. Die Länge des aufsteigenden Knotens. 5. Die Neigung. 6. Die siderische Umlaufzeit oder Umlaufzeit kurzweg, d. i. die Zeit, in welcher der Planet von der Sonne aus gesehen 360° beschrieben hat, also wieder in dieselbe Stellung gegen dieselben Fixsterne zurückkehrt. 7. *Die mittlere Länge des Planeten zur Zeit* des Perihels, welche man *Epoche* nennt. Die Berechnung wird nämlich erleichtert durch Einführung eines sogenannten mittleren Planeten, der in der Umlaufzeit des wirklichen Planeten aber mit gleichmäßiger Bewegung die Bahn eines Kreises durchläuft, dessen Radius gleich der halben großen Achse der wirklichen Bahn ist; den Bogenabstand desselben vom Frühlingspunkte, in der Richtung der Ekliptik gemessen zu der Zeit, wo der wirkliche Planet im Perihel steht, nennt man die mittlere Länge.

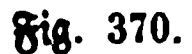
Diese Elemente sind *heliocentrisch*, d. h. die Sonne ist der Mittelpunkt der Ausmessungen; sie müssen aus den *geocentrischen* Elementen, die theilweise selbst beobachtet werden können, weil bei ihnen die Erde den Mittelpunkt der Messung bildet, abgeleitet werden, was nach einer von Gauß angegebenen Methode aus 3 genauen Beobachtungen geschehen kann.

Von der Erde aus haben die Planetenbahnen verwickelte Formen; ihre Bewegung ist nicht blos sehr ungleichmäßig (die erste Ungleichheit der Alten), sondern der Planet steht auch manchmal still, wird stationär, ja schlägt sogar statt der *rechtläufigen* Bewegung von Westen nach Osten manchmal die *rückläufige* von Osten nach Westen ein und bildet dadurch gezackte und verschlungene Bahnen (die zweite Ungleichheit der Alten); auch erscheint ein Planet an Größe sehr verschieden. In der Stellung zur Erde unterscheidet man die *inneren* oder unteren Planeten, Mercur und Venus, welche der Sonne näher sind als die Erde, von den übrigen oder *äußeren* oder oberen. Steht ein äußerer Planet in einer Richtung mit Erde und Sonne, aber auf der entgegengesetzten Seite wie die Sonne, so nennt man diese Stellung *Opposition*; steht er aber mit der Sonne auf derselben Seite der Erde, so heißt die Stellung *Conjunction*; die inneren Planeten haben keine Opposition, aber 2 Conjunctionen; die Stellung zwischen Erde und Sonne nennt man die *untere*, die jenseits der Sonne die *obere Conjunction*, diese Stellungen zusammen auch *Syzygien*; die Stellungen aber, in welchen die Verbindungslinien der Erde und des Planeten mit der Sonne rechte Winkel einschließen, *Quadraturen*. Die Zeit, welche zwischen 2 gleichen Stellungen eines Planeten gegen Sonne und Erde verfließt, z. B. die Zeit zwischen 2 Oppositionen, nennt man die *synodische Umlaufzeit* des Planeten; außer dieser und der eigentlichen oder siderischen Umlaufzeit spricht man noch von der *tropischen Umlaufzeit*, d. i. der Zeit, welche zwischen 2 gleichen Stellungen zum Frühlingspunkte liegt. Die tropische ist wegen der Präcession um einen geringen Betrag kleiner als die siderische; die synodische bei den 4 ersten Pl. größer, bei den 4 letzten kleiner als jene. — Die Umlaufzeit ist um so größer, je weiter die Planeten entfernt sind, nicht blos weil die entfernteren eine größere Bahn zu durchlaufen haben, sondern auch weil ihre Geschwindigkeit eine kleinere ist; denn für rein kreisförmige Bahnen würden sich nach dem 3. Keppler'schen Gesetze die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die

Wurzeln der Entfernungen verhalten, und da die Planetenbahnen nur sehr wenig von der Kreisform abweichen, so gilt dies Gesetz auch sehr nahe für die Planeten. Wären die Geschwindigkeiten der Planeten größer, so würden ihre Bahnen gestrecktere Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln werden. Die Umlaufzeiten der Planeten liegen zwischen $1/4$ und 164 Jahren, ihre Geschwindigkeiten zwischen 6 und $2/3$ Meilen. Die *Entfernungen* der Planeten von der Sonne befolgen kein aus den inneren Kräften ableitbares Gesetz, stehen aber doch in einer gewissen Symmetrie, die gewöhnlich als Titius'sches Gesetz angeführt wird. Die Entfernung des Mercur ist nämlich $0 . 6 + 8$ Mill. M., die der Venus $1 . 6 + 8$, der Erde $2 . 6 + 8$, des Mars $4 . 6 + 8$, der Planetoidengruppe durchschnittlich $8 . 6 + 8$ Mill. M. u. s. w. Man findet dieselbe nach dem 3. Keppler'schen Gesetze oder auch durch Beobachtung der Horizontalparallaxe. Die *Größe* der Planeten liegt zwischen 600 und 20 000 M. Durchmesser; man findet dieselbe trigonometrisch aus dem scheinbaren Durchmesser und der Entfernung. Die *Masse* der Planeten ist im Verhältnisse zur Sonnenmasse gering. Alles was sich um die Sonne dreht, hat zusammen noch nicht $1/800$ der Sonnenmasse; die Masse des größten Planeten ist 300 mal größer, die des kleinsten 12 mal kleiner als die Erdmasse, woraus die Dichte des ersten $= 1/4$, des letzteren $= 1\,1/2$ der Dichte der Erde folgt. Für Planeten mit Satelliten findet man die Masse des Planeten, indem man den Fall des Satelliten gegen den Planeten vergleicht mit dem auf gleiche Entfernung reducirten Falle der Erde gegen die Sonne; für Planeten ohne Satelliten muß man die Störungen zu Hülfe nehmen, welche ein Planet auf die Bahn eines anderen oder eines Kometen ausübt. Unter Störungen oder *Perturbationen* versteht man die Veränderungen, welche die Elemente einer Gestirnbahn durch die Anziehung benachbarter Weltkörper erfahren; so werden durch das periodisch wiederkehrende Näherkommen zweier Planeten die Länge und die Sonnenentfernung derselben periodisch geändert; dies sind *periodische* Störungen. Da aber durch diese die Planetenbahnen gegen einander Veränderungen erfahren, so muß die Lage jeder Bahn verändert werden, und zwar innerhalb sehr großer Perioden, weil ein Cyclus gleicher Bahnveränderungen nur in langen Zeiten wiederkehrt. Es entstehen daher auch Aenderungen der Excentricität, der Neigung, der Lage der Apsidenlinie oder der Länge des Perihels, der Bahnachse u. s. w.; diese sehr kleinen und in sehr langen Zeiträumen erst wiederkehrenden Aenderungen werden *säculare* Störungen genannt. So nimmt die Excentricität der Erdbahn bis zum Jahre 20 000 jedes Jahrhundert um 0,00004 ab und dann wieder zu; so nimmt die Schiefe der Ekliptik in unserem Jahrhundert um 0,47″ jedes Jahr ab; so nimmt die Länge des Perihels, welche 99° 30′ beträgt, jedes Jahr um 62″ zu; daher ist das *anomalistische Jahr*, die Zeit zwischen 2 Perihelstellungen, größer als das tropische Jahr, $=$ 365,25967 Tagen. Das Perihel der Erde, das gegenwärtig auf den 2. Januar fällt, rückt in 57 Jahren um 1° voran, also in 21 000 Jahren auf der ganzen Ekliptik herum, so daß in 10 500 Jahren die Sonnennähe der Erde im Sommer stattfindet.

Die scheinbaren Bahnen der Pl. mit ihren Ungleichmäßigkeiten, Stillständen, Rückgängen und Schleifen konnten nach den alten Systemen nur durch sehr gekünstelte Annahmen erklärt werden, ergeben sich aber aus dem Copernikanischen System höchst einfach als Folgen der Bewegung der P. und der Erde um die Sonne; von der Erde aus sehen wir einen P. nicht blos seine eigene westöstl. Bahn durchlaufen, weßhalb auch seine Hauptbewegung eine westöstl. ist, sondern wir sehen ihn auch eine scheinbare Bewegung, das Spiegelbild der Erdbahn, vollziehen, welche bald westöstlich, bald ostwestlich erscheinen kann und daher die eigene Bewegung des P. verstärken, aber auch aufheben und in die entgegengesetzte verwandeln kann. Denken wir uns nämlich einen äußeren P. ganz stillstehend zwischen der Erdbahn und der Himmelskugel, so scheint uns der P. auf dieser Kugel fortzurücken, wenn wir uns ohne es zu empfinden, fortbewegen, und zwar nach entgegengesetzter Richtung. Ist in der Erdbahnhälfte, die dem P. zunächst liegt, die westöstl. Bewegung der Erde von links

nach rechts gerichtet, so scheint der P. sich am Himmel von rechts nach links zu bewegen; in der anderen Erdbahnhälfte hat aber dann die Erde eine Bewegung von rechts nach links, weßhalb in dieser Zeit der P. sich von links nach rechts wenden muß. Diese scheinbare Bewegung eines P. mit der wirklichen verbunden erklärt alle Besonderheiten der scheinbaren Planetenbahnen; in Fig. 370 sind mit e versch. Stellungen der Erde, mit l versch. wirkliche Stellungen des Jupiter dargestellt und in J die hieraus folgenden Stellungen desselben; ähnlich erklärt sich, daß z. B. die Vesta in ihrer Bahn 1847 durch die Schulter der Jungfrau nach der Spica ging, sich dann in einer Schleife nach der Schulter zurückbog und abermals an der Spica vorbeiging.


Fig. 370.



Unterschiede zwischen den Planeten und Planetoiden. 1. Die Pl. haben Dm. von 600 bis 20 000 M., die Planetoiden nur von 3—70 M. 2. Die Pl. sind ziemlich regelmäßige Kugeln, die Planetoiden von unregelmäßiger Form. 3. Die 8 Pl. sind auf einem Raume von 8 bis 650 Mill. M. zerstreut, die Planetoiden meist auf eine Zone zwischen 50 und 60 Mill. M. beschränkt. 4. Die 8 Pl. haben sehr kreisähnliche, die Planetoiden mehr gestreckte Bahnen; die Exc. der ersteren ist durchschnittlich viel kleiner als die der letzteren. 5. Die Ebenen der Planetenbahnen fallen sehr nahe mit der Ebene der Erdbahn zusammen, die Planetoidenbahnen sind theilweise ziemlich steil gegen dieselbe gestellt.

Unterschiede zwischen den 4 ersten und den 4 letzten Pl., welche beide Gruppen durch die Planetoiden von einander getrennt sind. 1. Die 4 ersten haben durchschnittlich 10 mal kleinere Dm. als die 4 letzten, also 100 mal kleinere Oberflächen, 1000 mal kleinere Inhalte. 2. Die 4 ersten haben eine viel größere Dichte als die 4 letzten; z. B. die Dichte der Erde kommt fast der des Eisens gleich, die des Saturns erreicht nicht einmal die des Wassers. 3. Die 4 ersten haben kurze Umlaufzeiten von $^1/_4$ bis 2 J., die 4 letzten große von 11 bis 165 J. 4. Die 4 ersten haben lange Tage von 24 St., die 4 letzten kurze von ca. 10 St. 5. Die 4 ersten haben daher eine geringe, die 4 letzten eine starke Abplattung. 6. Die 4 ersten sind dunkel, die 4 letzten scheinen noch eigenes Licht zu haben. 7. Die 4 ersten sind arm an Satelliten, nur die Erde hat einen Mond und der Mars 2, die 4 letzten dagegen reich, Jupiter hat 4, Saturn 8 Monde und 3 Ringe, Uranus 6 Monde, Neptun 1 Mond.

567 1. Mercur ☿. Bei seiner geringen mittleren Entf. (8 Mill. M.) von der Sonne wird die Elongation, d. h. der scheinbare Bogenabstand des M. von der Sonne nie größer als 28°; der M. steht immer nahe bei der Sonne, geht daher kurz vor derselben auf, oder gleich nach derselben unter, so daß selbst sein glänzendes Licht unsere starke nördliche Dämmerung nicht überstrahlen und den trüben Horizont nicht durchdringen kann, weßhalb der M. bei uns nur selten, wohl aber in südlicheren Gegenden leichter gesehen wird. Seine größte Entf. von der Sonne beträgt 9,3, die kleinste 6,2 M. M., so daß die Exc. = 0,2 und die Neigung 7°, die größten aller Planetenbahnen sind. Mit dem Heliometer bestimmte Bessel den scheinbaren Dm. = 6,7″, woraus der Dm. des Mercur = 600 M. berechnet wird. Die Masse ergab sich 1841 aus der Störung des Encke'schen Kometen = $^1/_{12}$ der Erdmasse, neuerdings nur = $^1/_{23}$, wodurch auch die Dichte zwischen 9 und 5 (die der Erde = 6 gesetzt) und die Schwerkraft zwischen 0,6 und 0,3 der Erdschwere schwankend werden. In der oberen Conjunction wendet uns der M. seine beleuchtete Hälfte zu, erscheint daher als helle Kreisscheibe, in der unteren Conjunction wendet er uns die unbeleuchtete Hälfte zu, ist daher unsichtbar; in den Quadraturen können wir nur die Hälfte seiner beleuchteten Hälfte sehen, er erscheint daher als beleuchteter Halbkreis; zwischen unterer Conj. und Quadratur hat er Sichelform, zwischen Quadratur und oberer Conj. erscheint er größer wie ein Halbkreis. Der M. hat also Lichtwechsel oder Phasen, die mit der Stellung gegen Sonne und Erde, also in dem synodischen J. = 116 T. wiederkehren; das siderische J. beträgt nur 88 T., die Jahreszeiten sind also noch nicht 1 M. lang; der Wechsel der Jahreszeiten und Zonen mag dort dem der Erde analog sein, da die Schiefe seiner Bahn 20° beträgt; doch ist die Wärme wegen der größeren Sonnennähe 6 mal so stark als auf der Erde. Aus der

Wiederkehr einer Abstumpfung an einem Horne der Mercurssichel ergab sich die Rotationszeit oder der Tag = 24 St., und berechnete Schröter die Höhe der diese Abstumpfung verursachenden Berge zu 60 000′. Da die Sichelgrenze verwaschen ist und die Sichel schmaler erscheint, als der Rechnung entspricht, da außerdem helle und und dunkle, rasch wechselnde, nur von Wolken erzeugbare Flecken beobachtet wurden, so vermuthet man für den M. eine starke Atmosphäre. Neuere Untersuchungen, sowie das Sp. des M., machen die Existenz einer Atm. zweifelhaft, ja nach Zöllners (1874) Forschungen über die Albedo, d. i. die lichtreflectirende Fähigkeit des M. stimmt die Oberfläche desselben mit der des Mondes und besitzt er keine Atm. Auch die Berghöhen und die Tageslänge werden bezweifelt. Wenn die untere Conj. so nahe bei einem Knoten stattfindet, daß die Breite des M. kleiner als der scheinbare Sonnenradius ist, so steht er in gerader Linie zwischen uns und der Sonne, und geht in etwa 7 St. als schwarzer kreisförmiger Fleck über die leuchtende Sonnenscheibe, eine Erscheinung, die man *Durchgang* oder Passage des M. nennt. Am 7. Nov. 1881 wurde seit Keppler, der zuerst einen Durchgang vorausgesagt hatte, der 26. Durchgang des M. beobachtet; die nächsten sind am 9. Mai 1891 und 10. Nov. 1894. Aus seinen neuen Mercurtafeln hatte Leverrier geschlossen, daß, die bekannten Störungen abgerechnet, die Länge des Perihels sich noch um 40″ in 100 J. ändere, was auf die Existenz eines *intramercuriellen* Pl. hindeute, für den er den Namen Vulcan vorschlug. Da jedoch die Astronomen von Fach trotz fleißiger Beobachtung nie einen entsprechenden dunkeln Fleck über die Sonne hingehen sahen, wie der hypothetische Vulcan wegen seiner großen Sonnennähe doch oft erscheinen müßte, und außerdem trotz sorgfältiger Musterung des Himmels bei Sonnenfinsternissen keinen Planet bei der Sonne sahen, so hat man den Vulcan aufgegeben und wird sich zur Erklärung der Mercurstörung wohl an den Meteoritenring der Sonne halten müssen.

2. **Venus.** Da die V. durchschnittlich 14 Mill. M. von der Sonne entfernt ist, so ist ihre größte Digression nur 48°; sie geht bald nach der Sonne unter, ist Abendstern, Hesperus, oder nicht lange vor der Sonne auf, ist Morgenstern, Phosphorus. Sie zeigt Lichtphasen wie der Mercur, hat aber weder in der oberen Conj., wo sie als vollbeleuchteter Kreis erscheint, noch in der größten Digression, wo sie als Halbkreis auftritt, ihre größte Lichtstärke, weil sie dann noch zu weit von uns entfernt ist, sondern erst 35 Tage vor oder nach der unteren Conj., obwohl sie dann nur Sichelform besitzt. Die größte Entf. von der Sonne und die kleinste sind nur wenig verschieden, weil die Exc., die kleinste von allen, nur 0,007 ist; um so größer ist aber der Unterschied der Entf. von der Erde, 5 und 35 Mill. M., woraus sich die besondere Zeit der größten Lichtstärke erklärt, die indeß nur alle 8 J. wiederkehrt, dann aber bei diesem herrlichen Gestirne eine solche Höhe erreicht, daß es sogar Schatten erzeugt und bei hellem Tage sichtbar ist. Aus dem scheinbaren Dm. 17,5″ hat man den wirklichen Dm. = 1700 M. gefunden; jedoch ist der scheinb. Dm. des dunkeln Kreises der durchgehenden Venus nach Auwers (1874) nur 16,9″; jener Dm. von 1700 M. gilt also für Kern und Atmosphäre. Da die Masse = 5/6 Erdmassen ist, so ist ihre Dichte auch sehr nahe der Erddichte gleich. Ebenso ist die Rotationszeit, der Tag, sehr nahe dem Erdentage gleich, nämlich 23 St. 20 M., was sowohl aus der Wiederkehr von Flecken, als auch aus einer Abstumpfung eines Sichelhornes gefunden wurde, woraus Schröter eine Gebirgshöhe von 100 000′ berechnet hat. Aus der verwaschenen Sichelgrenze, aus der, wenn auch langsamen, Veränderlichkeit von selten wahrzunehmenden hellen und dunkeln Flecken, aus dem Unterschiede des scheinb. Dm. der hellen und der dunkeln Venus, sowie endlich aus der Thatsache, daß die nahe an der Sonne vorbeigehende Venus einen hellen Lichtkranz hat, der nur durch die starke Brechung einer Atm. entstehen kann, hat man die Existenz einer Atm. geschlossen, die nach Mädler dichter als die der Erde ist. Nach Zöllner (1874) zeigt die starke Albedo und nach Vogel (1873) das dem Sonnensp. fast gleiche Venussp. darauf hin, daß die dichte Atm. der V. so von Condensationsproducten erfüllt ist, daß schon von dieser das Sonnenlicht reflectirt wird; deßhalb erscheinen Vogel die Schlüsse Schröters über den Tag und die Achsenlage der V. aus den Flecken zweifelhaft; die Tageslänge wird übrigens von mehreren Forschern auf 24 St. geschätzt. Mit der dichten Atm. hängt vielleicht das secundäre oder aschfarbige Licht zusammen, daß manche Beobachter an dem unbeleuchteten Theile der V. sahen, und das vielleicht unserem Nordlichte ähnlich ist. Manche schreiben das aschfarbige Venuslicht einem vermutheten *Venusmonde* zu, den Cassini im 17. und mehrere Beobachter des 18. Jahrh. gesehen haben wollen. Schorr stellt 1875 alle Beobachtungen und Gründe für einen Venusmond zusammen, zu denen er auch auf der V. hinwandernde dunkle Flecken rechnete; jedoch werden die Mondbeobachtungen als *falsche Bilder* erklärt, die durch Reflexion des Lichtes zwischen dem Ocular des Fernrohres und der Hornhaut des Auges entstehen. Das siderische Jahr der V. ist 225 T., das synodische 584 T. lang; die Jahreszeiten sind dort länger als 50 T. und müssen sehr verschieden sein, wenn Schröters Angabe, daß die Schiefe der Bahn 72° betrage, richtig ist. Die interessanteste Venuserscheinung sind die Durchgänge, welche geschehen, wenn die untere Conj. so

568

nahe am Knoten stattfindet, daß die Breite kleiner als der scheinbare Sonnenradius ist; diese Durchgänge geschehen in Perioden von 105½, 8, 121½, 8 Jahren; die letzten waren 1761, 1769, 8. Dec. 1874, 6. Dec. 1882; der folgende ist erst am 8. Juni 2004.

Die astr. Eigenschaften der **Erde** wurden in dem 1. Abschnitte dieser 10. Abtheilung betrachtet; den phys. Eigenschaften ist die 11. Abth. gewidmet.

569 3. **Mars.** Wegen seiner mittleren Entf. von 30 Mill. M., welche die der Erde um 10 M. M. übersteigt, kann sich dieser rothe St. auf seinem 687 T. dauernden Umlaufe in Opposition, d. h. auf der der Sonne entgegengesetzten Seite der Erde befinden, also um Mitternacht durch den Meridian gehen; ebenso kann er nie dunkel oder als schmale Sichel oder Halbkreis erscheinen. Seine größte und kleinste Entf. von der Sonne sind sehr von der mittleren verschieden, weil seine Exc. = 1/11, 6 mal größer als die der Erde ist, die größte nach dem Mercur und daher für Keppler geeignet zur Entdeckung seiner Gesetze; noch verschiedener aber sind seine Entf. von der Erde, liegen zwischen 7 und 54 M. M., weßhalb er uns sehr verschieden groß und leuchtend erscheint und im günstigsten Falle alle Sterne überstrahlt. Der Dm. des Pl. beträgt 900 M., sein Inhalt ist daher 1/7 von dem der Erde; seine Masse, die man aus der störenden Einwirkung auf die Erde geschlossen hat, = 1/10 der Erdmasse, und daher seine Dichte 0,7 der Erddichte. Wie bei Mercur und Venus ist auch bei diesem Pl. die Abplattung unmerklich; dies entspricht der langen Rotationsdauer von 24 St. 40 M., die man aus der Beobachtung der Marsflecken gefunden hat. Solcher Flecken gibt es helle, beständige, wahrscheinlich Land, Continente, sodann dunkle, wahrscheinlich Meere, welche durch Hunderte von M. lange Straßen verbunden sind und sich nur manchmal durch atmosphärische Trübungen etwas verändern, und endlich an den Polen 2 weiße, im Marssommer abnehmende, im Winter zunehmende Flecken, offenbar Eismassen. Im Jahre 1882 fand Schiaparelli viele von den Kanälen verdoppelt (Jahreszeiten- oder [illegible]-werk?); die Eisflecken liegen nicht regelmäßig gegen die Pole, und der südliche ist stärker als der nördliche (Analogie mit der Erde). Aus diesen Erscheinungen, sowie aus dem Abnehmen der Fleckendeutlichkeit nach dem Marsrande zu, aus der größeren Verwaschenheit der Flecken im Winter, sowie aus der Lichtschwächung von Fixsternen am Marsrande folgt die Existenz einer unserer Luft ziemlich gleichen Marsatm. Im Sommer 1877 hatte der M. die kleinste Opposition in diesem Jahrh. zur Erde = 7½ M. M., weßhalb er zu dieser Zeit mit seinem rothen Lichte alle Sterne überstrahlte; zugleich wurde es durch diese geringe Entf. Asaph Hall in Washington möglich, zwei **Marsmonde** zu entdecken, denen er die Namen Phobos und **Deimos** gab. Dieselben weichen durch merkwürdige Eigenschaften von allen andern Satelliten ab. Zunächst müssen ihre Durchmesser kleiner als 20 M. sein, weil sie sonst eher und öfter von der Erde aus hätten gesehen werden müssen; sodann sind sie nur 1200 und 3400 M. vom Mars entfernt, und endlich sind ihre Umlaufzeiten ganz abweichend lang, nur 7½ und 30 Stunden. Hieraus und aus der Rotationszeit des Mars ergeben sich sonderbare Erscheinungen für diese Monde vom Mars aus gesehen; der Phobos geht für die Marsbewohner im Westen auf und im Osten unter, und zwar jeden Marstag zweimal, wobei er mehrmals seine Phasen wechselt, also den Marsbewohnern als Uhr dienen kann. Der Deimos geht im Osten auf und im Westen unter und zwar alle 5 Marstage einmal, wobei er zwischen Auf- und Untergang alle Phasen zweimal wechselt.

570 4. **Die Planetoiden.** Schon Keppler hatte in dem „Hiatus“ zwischen Mars und Jupiter Pl. vermuthet, und nach Aufstellung des Titius'schen Gesetzes mußte diese Vermuthung an Wahrscheinlichkeit gewinnen; doch entdeckten Piazzi in Palermo am 1. Januar 1801 die Ceres, und Olbers in Bremen 1802 die Pallas durch Zufall. Harding fand durch Vergleichung des Himmels mit seinen neu angefertigten Sternkarten 1804 die Juno, und da Olbers diese P. für Trümmer eines größeren hielt, so fand er durch fleißiges Suchen in der Nähe des Knotens der Bahnen 1807 die Vesta. Die Bahnen dieser P. berechnete Gauß nach einer neuen von ihm aufgestellten Methode, die in dem berühmtesten astr. Werk der Neuzeit „Theoria motus corporum coelestium“ enthalten ist. Als später immer genauere Sternkarten der äquatorialen Himmelsgegenden gezeichnet wurden, in welchen alle St. bis zur 11. Gr. Aufnahme fanden, konnte man mit Sicherheit einen neuen P. in jedem St. vermuthen, der an einer Stelle aufgefunden wurde, an welcher in den Karten keiner verzeichnet war. So begannen denn 1845 mit der Asträa (Hencke in Driesen) die Entdeckungen zahlreicher kleiner Weltkörper zwischen Mars und Jupiter, die man Planetoiden nannte, und deren Zahl 1884 über 240 gestiegen ist; 1852 wurden 8, 1861 10, 1868 12, 1875 17, 1879 gar 20 dieser kleinen Weltkörper aufgefunden. Die fleißigsten älteren Entdecker waren Luther in Bilk bei Düsseldorf und Peters in Clinton in Nordamerika, von denen der erstere bis 22. Sept. 1884 nicht weniger als 21, der letztere gar 42 entdeckt hat; dann folgen Watson in Ann Arbor in Nordamerika 22, Goldschmidt in Paris 14. Fleißige Entdecker der letzten Zeit sind Palisa in Pola, der in den letzten 10 J. 44 bis 22. Sept. 1884 gefunden hat, und Paul und Prosper Henry, die mittels der neuen Pariser bis zur 13. Gr. gehenden Aequatorialkarte in den letzten 10 J. 14 entdeckt haben. Man gibt diesen kleinen

Weltkörpern zwar auch Namen, bezeichnet sie aber mit der Ordnungsnummer der Entdeckung in einem kleinen Kreise, so die Ceres mit (1), die am 12. Sept. 84 von Luther entdeckte Germania mit (241). Die kleinste Umlaufzeit von etwas über 3 J. hat Medusa, die größte von fast 8 J. Hilda; erstere hat auch die kleinste mittlere Entf. von der Sonne, etwa 40 Mill. M., letztere die größte, fast 80 M. M. Die Entf. liegen meist zwischen 50 und 60 M. M.; doch nähert sich Phocäa bis 37 und entfernt sich Freja bis 83 M. M. Die Bahnen haben starke Excentricitäten, die der Aethra = 0,4 ist die größte, jedoch hat Philomela eine noch kreisähnlichere Bahn als die Venus. Auch schwache Neigungen finden sich; so hat Massalia nur 40′; bei den meisten ist aber die Neigung stark, die der Pallas beinahe 35°, so daß die Bahnen weit über den Thierkreis hinausgehen; die Neigungen wachsen mit den Excentricitäten so regelmäßig, daß d'Arrest den Zusammenhang durch eine Formel ausdrücken konnte; auch sind häufig 2 Planetoiden in Neigung und Exc. so verwandt, daß man sie als Paare ansehen kann, während bei anderen Gruppen die Knoten sehr nahe zusammen fallen und die Bahnen so verschlungen sind, daß man bei einer Darstellung derselben durch Ringe keine Bahn aus dem ganzen System nehmen könnte, ohne einen großen Theil der übrigen mitzunehmen. Die Größe der Planetoiden ist sehr unbedeutend; Hestia hat nur 3, Vesta 70 M. Dm.; die Form ist nie kreisscheibenartig, die Verschiedenheit der von verschiedenen Forschern angegebenen Durchmesser eines und desselben Planetoiden deutet vielmehr auf eine eckige Form. Aus all diesen Eigenthümlichkeiten hat man früher öfter geschlossen, daß die Planetoiden Trümmer eines durch eine Weltkatastrophe zerstörten P. seien, neigt sich aber jetzt zu der Annahme, daß dieselbe gleichzeitig mit der Abschleuderung stattgefunden habe.

5. **Jupiter**, der größte P., ein heller, gelber Stern erster Größe, hat beinahe 20 000 M. Dm., übertrifft also die Erde an Inhalt mehr als 1200 mal; da aber seine aus den Störungen der Planetoiden und der Anz. seiner Monde gefundene Masse $^1/_{1048}$ der Sonnenmasse ist, also die Erdmasse nur 310 mal übertrifft, so folgt, daß seine Dichte nur $^1/_4$ der Erddichte ist, also nicht viel die des Wassers übersteigt. Trotz dieser geringen Dichte besitzt er fast die 3fache Masse aller übrigen P. zusammen genommen und würde dieselben nach dem Verschwinden der Sonne um sich drehen. Seine Entf. von der Sonne beträgt im Mittel 104 M. M.; die Bahn weicht nur wenig vom Kreise ab, hat nur eine Exc. von 0,05, und eine ebenfalls geringe Neigung. Seine Umlaufzeit beträgt bei einer Geschw. von 1,8 M. nahezu 12 J.; die Jahreszeiten dauern also 3 J., sind aber nur wenig verschieden, da die Neigung seines Aeq. gegen seine Bahn nur 3° beträgt; um so rascher wechseln die Tageszeiten, da seine Rotation in 10 St. stattfindet, was mit seiner starken Abplattung = $^1/_{17}$ stimmt. Man hat die Rotationszeit aus den Flecken gefunden, die sowohl isolirt, wie auch in dem breiten, dunkeln, dem Aeq. parallelen Streifen oder Banden auftreten, welche theilweise sehr beständig, theils sehr veränderlich große Theile, namentlich der südl. Hälfte des Planeten bedecken. Der mächtig breite Aequatorstreifen verschwindet als Ganzes nie, erleidet aber in seinem Inneren häufige Veränderungen, die an Bilden und Vergehen von Wolken erinnern, die Farbe des Streifens in allen Stufen von dunklem Roth und Gelb verändern und mit den Sonnenflecken in Zusammenhang stehen. Die anderen Streifen sind als Ganzes, wie in ihrer inneren Bildung stetem Wechsel unterworfen, lassen aber manchmal einen Fleck lange constant; so steht seit 1878 in der südl. Hälfte ein rother, ovaler Fleck mit scharfer Begrenzung, aus dessen Beobachtung man die genaue Rotationszeit zu finden gedenkt. Nach dem Rande zu werden die Banden schwächer, verschwinden am Rande ganz und zeigen hierdurch die Existenz einer Atmosphäre an, die auch aus dem Dunkelwerden der Scheibe nach dem Rande zu folgt. Nach O. Lohse entstehen die Banden durch großartige Gaseruptionen aus dem feurig flüssigen Inneren des Jupiter, welche die Wolken auflösen und durch ihre kleinere Rotationsgeschw. sich parallel zum Aeq. lagern. Aus der starken Leuchtkraft des J. nämlich im Vergleiche zu der des Mars und in Verbindung mit seiner Größe, aus der großen Dichte seiner Atm. hat man geschlossen, daß der P. noch in feurig flüssiger Gluth sei. Hoch interessant steht der J. durch ein Fernrohr aus, ein kleines Weltsystem mit 4 Trabanten in lebhaft wechselnden Stellungen; die Monde sind verhältnißmäßig nicht so weit vom J. als unser Mond von der Erde entfernt, 57 bis 250 Tausend M., drehen sich aber sehr rasch um den P., in 42 St. bis 16 T., haben eine bedeutende Größe, 500—700 M. Dm., größer als unser Mond, und werden fast bei jedem ihrer raschen Umläufe durch den mächtigen Schatten des J. verfinstert, woraus Römer zuerst die Geschw. des Lichtes bestimmte.

6. **Saturn**. Obwohl dieser weiße ruhige St. nur $^1/_{28}$ der Helligkeit des Jup. besitzt, indem er fast doppelt so weit als dieser, 190 M. M., von der Sonne entfernt ist, so erscheint er doch noch als St. 1. Gr., da sein Dm., 17 000 M., dem des Jupiter fast gleich kommt. Indessen kann er der Sonne auf 160 M. M. nahe rücken und sich auf 220 M. M. ent-

fernen, da die Exc. seiner Bahn ziemlich groß = 0,06 ist; ebenso ist auch seine Kugelform stark abgeplattet, fast 1/10, womit seine rasche Rotation, in 10 St. stimmt, während er für seine Revolution 29 Jahre braucht. Die Rotation schloß man aus dunkeln Flecken, die sich in mehreren dem Aeq. parallelen Streifen finden, die wie beim Jup. oft lange constant bleiben, während die Polargegenden im Winter etwas heller werden. Man hält dies für Veränderungen in den oberen Schichten des S., denen man eine wolkenartige Beschaffenheit zuschreibt, und unterhalb deren man nur einen kleinen Kern voraussetzt, und zwar deshalb, weil die Dichte des S. nur 1/9 der Erddichte beträgt und der P. demnach nicht einmal durchgängig aus Wasser bestehen kann. Die Masse des ganzen S. beträgt nämlich nur 100 Erdmassen, während sein Vol. = 900 Erdinhalten ist. Das Saturnsystem ist das reichste der Partialsysteme unserer Sonne, indem 8 Monde und 3 Ringe um den P. kreisen; die Monde sind 3—64 Saturnshalbmesser von demselben entfernt, haben Umlaufzeiten von 22 St. bis 80 T., und befolgen hinsichtlich der Abstände und der Umlaufzeiten eine der Titius'schen Regel ähnliche Reihenfolge. Das ältere Ringsystem hat einen äußeren Dm. von 37 000, einen inneren von 25 000 M., ist also 6000 M. breit, von dem P. 4000 M. entfernt und durch eine Spalte von 400 M. Breite in 2 Abtheilungen getheilt; 1850 wurde innerhalb dieses Ringsystemes ein 3. durchsichtiger Nebelring entdeckt. Die Dicke des Ringes beträgt vielleicht nur 30 M., daher ist er, wenn die Sonne nur die Kante bescheint, d. i., wenn die Ebene des Ringes durch die Sonne geht, was in jedem Saturnsjahr zweimal stattfindet, entweder gar nicht oder nur als schmale, schwache Lichtlinie sichtbar; sonst erscheint er in Form von Henkeln oder Ansen, weil seine Ebene gegen die Ekliptik um 28° geneigt ist, und weil die Theile vor und hinter der Saturnskugel unsichtbar sind. Doch kann er auch noch unsichtbar werden, wenn seine Ebene durch die Erde geht, aber nicht durch die Sonne, weil dann die allein für uns sichtbare Kante nicht beleuchtet ist, sowie wenn Erde und Sonne auf entgegengesetzten Seiten der Ringebene stehen, weil dann der uns zugewandte Theil unbeleuchtet ist.

573 7. Uranus (W. Herschel 1781) erscheint als St. 6.—7. Gr., da er fast doppelt so weit als Saturn, im Mittel 380 M. M. entfernt ist und nur 8000 M. Dm hat. Seine Umlaufzeit beträgt 84 J., seine Tageszeit ist nicht bekannt, kann aber nur kurz sein, da man eine starke Abplattung wahrgenommen hat. Das Vol. ist 100 mal, die Masse nur 16 mal größer als bei der Erde, woraus die Dichte sich = 1/6 der Erddichte ergibt. Herschel nahm 6 Trabanten am U. wahr, von denen indeß Lassell nur 4, Ariel, Umbriel, Titania und Oberon beobachten konnte, deren Elemente Newcomb in Washington (1873) aufgestellt hat. Diese Monde sind, wenigstens die beiden äußeren, rückläufig und ihre Bahnen stehen fast auf der Ekliptik senkrecht; da nun die Mondbahnen gewöhnlich mit dem Aeq. zusammenfallen, so müßte der Aeq. des U. auf der Ekliptik und daher auch nahezu auf seiner eigenen Bahn senkrecht stehen, wenn sich der U. wie die anderen P. verhielte; hierdurch würden die Zonen und Jahreszeiten des U. ganz abweichend werden. Besonders wichtig wurden die Störungen des U.; sie führten zur Entdeckung des

574 8. Neptun (Leverrier und Galle 1846). Am U. zeigten sich Störungen, welche sich aus den bekannten Pl. nicht erklärten, und welche daher die Vermuthung erweckten, daß sie von einem transuranischen unbekannten P. herrühren dürften. So wie man aus der bekannten Stellung eines störenden P. nach dem Gravitationsgesetze die Art und Größe einer zukünftigen, also noch unbekannten Störung herausrechnen kann, so kann man auch aus einer bekannten Störung die Stellung des unbekannten störenden P. finden. Leverrier stellte sich daher die Aufgabe, die Elemente des unbekannten P. zu berechnen, welcher die bekannten aber unerklärten Störungen des U. hervorzubringen vermöchte, und theilte die Resultate dieser Rechnung der Berliner Sternwarte mit, weil man auf dieser kurz vorher neue sehr vollständige Sternkarten der äquatorialen Gegenden angefertigt hatte und demnach mit Bestimmtheit einen Stern für einen P. erkennen mußte, der an einer Stelle des Himmels stand, an welcher die Karten keinen St. enthielten; noch am Tage des Empfanges der Nachricht, 25. Sept. 1846, fand Galle an der bezeichneten Stelle den P., der dann den Namen Neptun erhielt. Nähere Untersuchung ergab, daß dessen Entf. von der Sonne 620 M. M. beträgt, also nicht der Titius'schen Regel entspricht. Die Umlaufzeit um die Sonne beträgt 164 Jahre, der Dm. 7500 M., die Masse und Dichte sind größer als beim U. Lassell fand 1847 einen Neptunstrabanten, der in 5 T. um den P. läuft und besser sichtbar, also größer ist als die Uranusmonde.

575 Das Zodiakallicht erscheint in der Tropenzone jeden Abend und Morgen, bei uns hauptsächlich im Frühling und Herbst als ein zarter kegelförmiger Schimmer, dessen Basis an der Stelle den Hor. berührt, wo unter diesem die Sonne steht, dessen Achse in die Richtung der Ekliptik fällt, und dessen Spitze bis zu einer Höhe von 50—90° aufsteigt. Viele halten es für einen Nebelring, der zwischen der Venus- und Marsbahn frei im Weltraume schwebend die Sonne umziehe, und durch welchen die Erde etwa im Jahresanfange hindurch gehe. Heis dagegen erklärt das Zodiakallicht, gestützt auf einen öfter von ihm wahrgenommenen

Gegenschein von gleicher Form an der entgegengesetzten Himmelsseite, für einen nebelartigen Ring, der innerhalb der Mondbahn um die Erde kreise und durch den Erdschatten theilweise verfinstert werde. Felice Marco hält es für Influenzlicht und Newcomb für einen Meteoritenring, der ganz nahe an der Sonne beginne, mit abnehmender Dichte bis an die Erde reiche und vielleicht die Störungen des Mercur verursache.

5. Der Mond und die Finsternisse.

Astronomische Erscheinungen des Mondes. Bestimmt man mittels der Parallaxe die Entfernung des Mondes von der Erde, so findet man dieselbe ca. 50 000 M., also 400 mal kleiner als die der Sonne. Leicht fällt in die Augen, daß der Mond von Westen nach Osten durchschnittlich jeden Tag 13° zwischen den Sternen hinwandert; da seine Entfernung sich hierbei nicht viel ändert, so folgt daraus, daß er in ca. 28 Tagen um die Erde kreist, daß er ein Trabant der Erde ist. Seine Bahn ist eine Ellipse mit 0,055 Excentricität und einer Neigung von 5° gegen die Ekliptik, welche aber um 18′ veränderlich ist. Außerdem behält die Bahn nicht dieselbe Lage bei, die Knoten rücken in 19 Jahren von Osten nach Westen also rückläufig durch die ganze Ekliptik herum, und auch die Apsidenlinie beschreibt schon in 8 Jahren rechtläufig eine ganze Drehung. Die scheinbare Größe des Mondes ist in der mittleren Entfernung = 31′ 19″, woraus sich der Durchmesser = 469 M. ergibt; folglich ist das Volumen des Mondes $^1/_{50}$ des Erdinhaltes. Die Masse des Mondes hat man aus seiner anziehenden Wirkung auf die Erdmeere, aus der Fluth, berechnet und = $^1/_{80}$ der Erdmasse gefunden, woraus sich die Mondschwere = $^1/_6$ der Erdschwere und die Monddichte = 0,6 der Erddichte ergab. Da der Mond in 28 T. um die Erde kreist, so nimmt er verschiedene Stellungen gegen Erde und Sonne ein, welche die Lichtwechsel oder Phasen des Mondes erzeugen. Steht der Mond zwischen Sonne und Erde in Conjunction, so wendet er uns die unbeleuchtete Hälfte zu, ist unsichtbar: Neumond; wenn er sich nun von der Sonne nach Osten zu entfernt, so steht er in 7 Tagen in Quadratur, seine westliche oder rechte Hälfte ist erleuchtet, von der wir nur die Hälfte sehen: es ist erstes Viertel; 7 Tage später steht er in Opposition, wendet uns dieselbe Hälfte wie der Sonne zu, erscheint uns daher ganz beleuchtet: es ist Vollmond; wieder 7 Tage später steht er nach Osten zu 3 Quadranten von der Sonne entfernt, nach Westen zu 1 Quadrant, seine östliche oder linke Hälfte ist beleuchtet: es ist letztes Viertel. Findet der Neumond in oder nahe bei einem Knoten statt, so ist Sonnenfinsterniß; findet der Vollmond nahe bei einem Knoten statt, so ist Mondfinsterniß. Eine Mondphase wiederholt sich, wenn der Mond in dieselbe Stellung zu Sonne und Erde zurückkehrt; die Zeit, in welcher dies geschieht, nennt man den synodischen Monat = 29 T. 12 St. 44 Min.; er ist länger als der siderische Monat = 27 T. 7 St. 43 Min. 12 Sec., die Zeit einer ganzen Drehung oder der Wiederkehr zu denselben Fixsternen. Diese Umlaufzeit und die 4 Phasen haben die Eintheilung des Jahres in Monate und Wochen veranlaßt. Der Mond dreht sich um sich selbst und zwar in derselben Zeit, in der er sich um die Erde dreht, was nach Hansen davon herrührt, daß der Schwerpunkt des Mondes 8 M. jenseits des Mittelpunktes liegt. Wegen der Gleichheit der Zeit der Revolution und der Rotation wendet uns der Mond immer dieselbe Seite zu, mit Ausnahme einer kleinen seitlichen Schwankung, die man Libration nennt. Die Mondbahn erfährt eine ganze Reihe von periodischen und säcularen Störungen; die wichtigsten sind: 1. die Evection, 2. die Variation, 3. die jährliche Gleichung, 4. die Schwingung der Neigung, 5. der Rückgang der Knoten, 6. das Fortschreiten der Apsiden, 7. die Acceleration. 576

Während für die meisten Fixst. selbst die jährl. Parallaxe zu klein ist, um nach den jetzigen Methoden auffindbar zu sein, und während für die Sonne und die Pl. die Hori-

zontalparallaxe nur mit Schwierigkeiten gefunden werden kann, macht für den Mond schon eine kleine Standlinie eine meßbare Parallaxe möglich. Unter Parallaxe kurzweg versteht man den Winkel (Fig. 371), den 2 von den Endpunkten einer Standlinie nach einem Himmelspunkte gezogene Visirlinien mit einander einschließen; bilden diese 2 Linien mit der Standlinie ein gleichsch. Dreieck, und kennt man in demselben die Basis, nämlich die Standlinie, und den Winkel an der Spitze, d. i. die Parallaxe, so kann man sowohl mittels geom. Constr. als auch und zwar genauer auf trigonometrischem Wege die Schenkel des Dreiecks, d. i. die Länge der Visirlinien, d. i. die Entf. des Himmelspunktes von den Standpunkten finden. Liegen die beiden Standpunkte auf einem Meridian, zu beiden Seiten des Aeq., so ist die Parallaxe, wie Fig. 371 ergibt, gleich der Summe der Zenitdistanzen des Himmelspunktes vermindert um die Summe der geographischen Breiten der Standpunkte. Denn $\alpha = \delta - \varphi$ und $\alpha' = \delta' - \varphi'$, woraus die Parallaxe $\alpha + \alpha' = \delta + \delta' - (\varphi + \varphi')$. Es beobachtete 1751 Lalande in Berlin die Zenitdistanz des südlichen Mondrandes, als derselbe in den Meridian trat $= 41° 13' 44''$ und Lacaille dieselbe am Cap $= 46° 33' 37''$; die Breiten der beiden Orte sind $52° 31' 13''$ und $33° 55' 15''$; hieraus ergab sich die Parallaxe $= 1° 22' 53''$. Nun mußte man zur Berechnung der Entf. noch die Erdsehne zwischen Berlin und dem Cap kennen; einfacher ist dieselbe jedenfalls, wenn eine schon bekannte Standlinie zu Grunde gelegt wird; deßhalb hat man den Erdradius als Standlinie gewählt, und nennt Höhenparallaxe den Winkel, den 2 von den Endpunkten eines Erdradius nach dem Himmelspunkte z. B. dem Monde gezogene Visirlinien mit einander machen; von dem Oberflächenpunkte kann man nach dem Monde wirklich visiren, von dem Erdmittelp. aber nicht; indeß diese 2. Visirlinie trifft die Erdoberfläche in einem Punkte, in dessen Zenit der Mond steht; demnach muß der eine der beiden in einem Meridian aufgestellten Beobachter den Mond in seinem Zenit haben und die Stellung desselben zur Himmelskugel, zu den Fixst. notiren, während der andere dasselbe thut; der Bogen zwischen den beiden Stellungen ist die Höhenparallaxe. Die Höhenparallaxe ist um so kleiner, je näher der Mond dem Zenit dieses zweiten Beobachters steht; die Horizontalparallaxe ist demnach die größte, weßhalb sie meist benutzt wird. Sie ist auch am leichtesten zu beobachten, denn sie ist gleich dem Bogenabstande der 2 Punkte des Himmels, an welchen der Mond für 2 Beobachter steht, von welchen der eine den Mond im Zenit hat, während er für den anderen eben aufgeht oder im Hor. erscheint, weßhalb diese Parallaxe **Horizontalparallaxe** genannt wird. So findet man die mittlere Horizontalparallaxe $= 58' 44''$ und daraus die mittlere Entf. des Mondes $= 51\,800$ M.; bestimmt man dieselbe in verschiedenen Stellungen, so findet man die kleinste, das Perigäum $= 48\,950$ M. und die größte, das Apogäum $= 54\,650$, woraus die Exc. der Mondbahn $= 0{,}055$ sich ergibt.

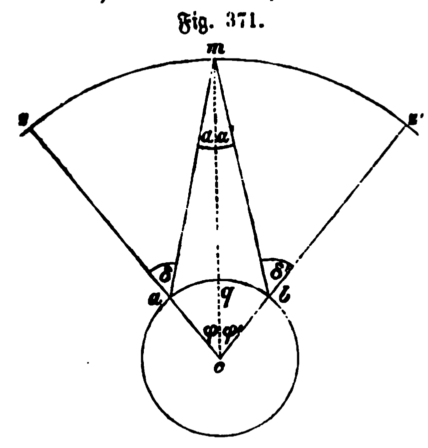


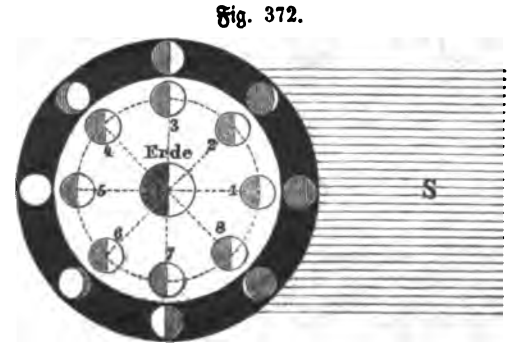
Fig. 371.

Die Bahn des Mondes um die Sonne stellt man sich häufig als eine verschlungene Radlinie vor; doch sind die Ein- und Ausbiegungen der Mondbahn zu beiden Seiten der Erdbahn so unbedeutend, daß man an einer Zeichnung der Mondbahn ohne die Erdbahn solche nicht wahrnehmen kann, sondern nur eine durchweg convexe Curve sieht. Wegen der Neigung der Mondbahn gegen die Ekliptik ist die größte Höhe des Mondes zu verschiedenen Zeiten noch verschiedener als die der Sonne. Die höchste Sonnenhöhe im Sommer beträgt bei uns 64°, die Summe der Aequatorhöhe und der Schiefe der Ekliptik, am 21. Dec. nur 17°, die Differenz derselben beiden Größen. Der Mond steht nun jeden Monat 5° über und unter der Ekliptik, und zwar der Neumond, da er bei der Sonne steht, 5° über oder unter der Sonne selbst, was unsichtbar ist, und der Vollmond, da er der Sonne gegenüber steht, 5° über oder unter dem entgegengesetzten Theile der Ekliptik; der Vollmond steht also im Sommer im südlichen Theile der Ekliptik, unter dem Aeq., im Winter im nördlichen Theile, über dem Aeq.; deßhalb scheint der Mond im Winter länger und steht höher als im Sommer, er kann im Winter bei uns 68° Höhe erreichen und im Sommer bis auf 12° Höhe herabgehen. Doch wiederholen sich diese Erscheinungen nicht jedes Jahr in gleicher Weise wegen des Rückganges der Knoten. Schneidet der Mond die Ekliptik in ihrer höchsten Stelle wie im Jahre 1872, so stimmt seine höchste und tiefste Höhe mit der der Sonne; da Finsternisse nur stattfinden, wenn der Mond der Ekliptik nahe kommt, so müssen die-

selben jetzt zur Zeit des höchsten und tiefsten Sonnenstandes, der Solstitien, eintreten. Nach 19 J. aber haben die Knoten wieder dieselbe Lage; folglich rücken sie nach 5 J. in die Aequinoctien, dann finden also die Finsternisse zu diesen Zeiten statt. Die Chaldäer kannten schon die Periode von 223 Monaten, innerhalb welcher die Monderscheinungen sich wiederholen, und Thales soll hieraus eine Sonnenfinsterniß vorausgesagt haben.

Da der Neumond (Fig. 372) (1) zwischen uns und der Sonne steht, so befindet er sich für uns bei der Sonne, geht mit ihr auf und unter, ist bei Tage am Himmel. Nach dem Neumonde bewegt sich der Mond von der Sonne weg nach Osten zu, steht etwas östl. von der Sonne, folglich ist ein schmaler Theil seiner westl., oder da wir den Mond immer im Süden sehen, seiner rechten Seite beleuchtet; dieser erscheint uns sichelförmig nach rechts gekrümmt (2), weil Ausschnitte einer Kugeloberfläche gekrümmt sind und nach den Enden hin schmäler werden; da die Sichel des wachsenden Mondes östlich von der Sonne steht, so geht sie bald nach der Sonne unter und auf, der zunehmende Mond ist Abends am Himmel, Nachts und Morgens nicht; bei Tage aber sieht man die Sichel als Silberschiffchen der Sonne folgen. Neben der leuchtenden Mondsichel sieht man bei Nacht den übrigen Theil des Mondes schwach grau beleuchtet, das aschgraue Licht des Mondes; dasselbe rührt von dem Erdscheine her, der zur Zeit unseres Neumondes für etwaige Mondbewohner als Vollerde, zur Zeit unserer Mondsicheln dort noch nahezu als Vollerde auftritt und daher den dunkeln Mondtheil beleuchtet; die Sichel scheint einem größeren Kreise anzugehören, wegen der Ausbreitung des stärkeren Lichteindruckes auf unserer Netzhaut. Wenn sich nun auf seiner westöstlichen Bahn der Mond immer weiter von der Sonne nach Osten zu entfernt, so sehen wir ein immer

Fig. 372.

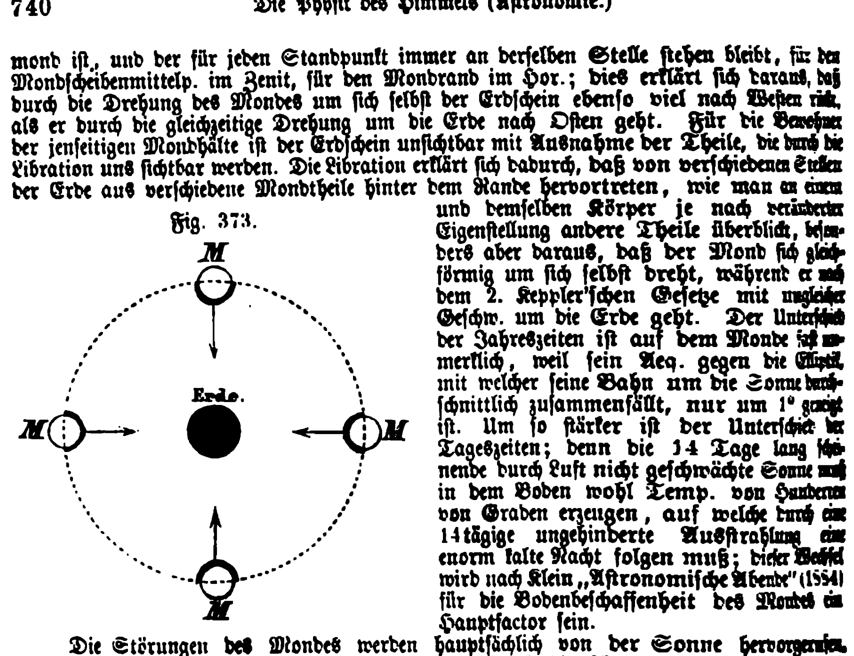


größeres Stück der westlichen beleuchteten Hälfte, die Sichel wird immer breiter und wird in 7 Tagen zu einem Halbkreise (3), weil der mittlere Kreis einer Kugel uns als gerade Linie erscheint; da dieses erste Viertel in der östlichen Quadratur auftritt, so geht der Mond 1/4 Tag nach der Sonne unter; das erste Viertel ist von Nachmittag bis Mitternacht am Himmel, es erhellt die Abende. Während der Neumond mit der Sonne aufgeht, geht das erste Viertel 6 Stunden später auf, weil in diesen 7 T. der Mond ein Viertel seines Kreises zurückgelegt hat; der Mond geht daher jeden Tag 6/7 Stunden, etwas über 50 M. später auf. Beim Vollmonde steht der Mond der Sonne gegenüber (5), er geht auf, wenn die Sonne untergeht, er ist bei Nacht am Himmel, er leuchtet die ganze Nacht, doch mehr im Winter wie im Sommer. In der zweiten Quadratur (7), beim letzten Viertel, steht der Mond nach Osten zu 3 Quadranten, also nach Westen zu 1 Quadrant von der Sonne entfernt, die östliche oder linke Mondhälfte ist erleuchtet, der Mond geht 6 St. vor der Sonne auf, ist von Mitternacht bis Mittag am Himmel, leuchtet Morgens. Es findet wieder Neumond statt (1), wenn der Mond wieder zwischen Erde und Sonne steht; während aber der Mond vom vorigen Neumonde an sich völlig in 27¹/₄ T., in dem siderischen Monat um die Erde drehte, ist die Erde auf ihrer westöstl. Bahn um die Sonne um $27^1/_4 / 365 = {}^1/_{13}$ vorangegangen; diesen Theil des Himmels muß der Mond noch zurücklegen, um wieder zwischen Erde und Sonne zu gelangen; daher ist der synodische Monat, die Zeit zwischen 2 gleichen Mondphasen länger als der siderische und zwar $27^1/_4 / 13$, d. i. mehr als 2 Tage.

Wenn man eine geschlossene mit Wasser und Quecksilber theilweise gefüllte Röhre radial aber geneigt in einer Schwungmasch. aufstellt und rasch dreht, so geht das Quecksilber nach außen, das Wasser nach innen. Da nun wegen der großen Geschw. und dem kleinen Krümmungsradius der Mondbahn die Centrifugalkraft in derselben zu bedeutender Geltung gelangt, so mußten die schwereren Massen nach der jenseitigen Hälfte des Mondes gehen und müssen nun durch ihre Centrifugalkraft den Mond in dieser Stellung erhalten. Hieraus folgt nach Hansen, daß der Mond der Erde immer dieselbe Seite zuwenden muß, daß seine Rotationszeit mit der Umlaufzeit um die Erde stimmt (Fig. 373); auf dem Monde sind also Tag und Nacht 28 Erdent. lang. Da auf dem Monde die Luft fehlt, so ist am T. der Himmel nicht blau, sondern schwarz, hell ist es nur, wohin die Sonne scheint, Dämmerung, Morgenroth und Wolken fehlen, bei Nacht erscheinen die St. nur als Punkte; doch wird die lange Nacht durch den Erdschein erhellt, der 13 mal größer als unser Voll-

mond ist, und der für jeden Standpunkt immer an derselben Stelle stehen bleibt, für den Mondscheibenmittelp. im Zenit, für den Mondrand im Hor.; dies erklärt sich daraus, daß durch die Drehung des Mondes um sich selbst der Erdschein ebenso viel nach Westen rückt, als er durch die gleichzeitige Drehung um die Erde nach Osten geht. Für die Bewohner der jenseitigen Mondhälfte ist der Erdschein unsichtbar mit Ausnahme der Theile, die durch die Libration uns sichtbar werden. Die Libration erklärt sich dadurch, daß von verschiedenen Stellen der Erde aus verschiedene Mondtheile hinter dem Rande hervortreten, wie man an einem und demselben Körper je nach veränderter Eigenstellung andere Theile überblickt, besonders aber daraus, daß der Mond sich gleichförmig um sich selbst dreht, während er nach dem 2. Keppler'schen Gesetze mit ungleicher Geschw. um die Erde geht. Der Unterschied der Jahreszeiten ist auf dem Monde fast unmerklich, weil sein Aeq. gegen die Ekliptik, mit welcher seine Bahn um die Sonne durchschnittlich zusammenfällt, nur um 1° geneigt ist. Um so stärker ist der Unterschied der Tageszeiten; denn die 14 Tage lang scheinende durch Luft nicht geschwächte Sonne muß in dem Boden wohl Temp. von Hunderten von Graden erzeugen, auf welche durch eine 14tägige ungehinderte Ausstrahlung eine enorm kalte Nacht folgen muß; dieser Wechsel wird nach Klein „Astronomische Abende" (1884) für die Bodenbeschaffenheit des Mondes ein Hauptfactor sein.

Fig. 373.



Die Störungen des Mondes werden hauptsächlich von der Sonne hervorgerufen. 1. Die Evection (Ptolemäus 130) besteht darin, daß die Länge des Mondes zur Zeit der Syzygien größer, zur Zeit der Quadraturen aber kleiner ist, als sie nach der elliptischen Bahn sein sollte. Durch die Anziehung der Sonne werden in den beiden ersten Stellungen Erde und Mond weiter von einander entfernt, die Erde zieht den Mond schwächer an, und dessen Bewegung wird hierdurch langsamer. 2. Die Variation (Tycho de Brahe 1590) besteht in einer Verminderung oder Vermehrung der Länge in den Octanten, den Mitten zwischen Quadraturen und Syzygien, welche durch die Tangentialkraft des Mondes hervorgebracht wird. 3. Die jährliche Gleichung (Tycho) besteht darin, daß die Evection im Winter stärker ist als im Sommer, weil im Winter die anziehende Wirkung der Sonne größer ist, da das Perihel der Erde im Winter stattfindet. 4. Die Schwingung der Neigung und 5. der Rückgang der Knoten haben ihren Grund darin, daß die Mondbahn nicht in die Ekliptik fällt, daß aber die Sonne in der Ekliptik anziehend wirkt, wodurch, da der Mond bald dies- bald jenseits der Ekliptik steht, die Neigung um 18 Minuten hin- und herschwankt, und der Mond immer etwas eher in die Ekliptik tritt, als es nach der rein elliptischen Bahn sein sollte. Es rücken daher bei jedem Mondumlaufe die Knoten dem Monde entgegen, bewegen sich von Osten nach Westen und haben in 19 Jahren wieder die frühere Stelle erreicht, die alte chaldäische Mondperiode. Die Zeit, in welcher der Mond die Ekliptik auf derselben Seite wieder schneidet, die Zeit zwischen zwei gleichnamigen Knoten, der Drachenmonat ist daher kürzer als die Umlaufzeit, beträgt nur 27 T. 5 Stunden. 6. Das Fortschreiten der Apsiden besteht darin, daß die Apsidenlinie in nahezu 9 Jahren eine rechtläufige Drehung vollendet, und rührt daher, daß die Sonne das Bestreben hat, die Mondbahn nach sich hin in die Länge zu ziehen und dadurch die große Achse derselben hinter sich drein zu drehen. Diese Drehung beträgt jährlich 40°; Perigäum und Apogäum eilen deßhalb dem Monde voraus, weßhalb der anomalistische Monat, die Zeit zwischen zwei Perigäen etwas größer als der siderische Monat, = 28 T. 13 St. ist. 7. Die Acceleration (Halley) besteht darin, daß ausnahmsweise bei dem Monde die siderische Umlaufzeit, die bei allen Weltkörpern constant ist, sich schon seit Jahrtausenden verkürzt, also seine Geschwindigkeit sich vergrößert. Diese Erscheinung rührt daher, daß die Exc. der Erdbahn sich 50 000 Jahre lang verkleinert und dann eben so lange vergrößert, wodurch im ersten Falle die Sonne dem Monde etwas näher kommt und dadurch seine Geschwindigkeit etwas vergrößert.

577 **Physik des Mondes.** Der Mond hat keine Atmosphäre, also auch kein Wasser, keine Meere, keine Flüsse. Man unterscheidet auf seiner Oberfläche schon mit blosem Auge helle und dunkle Stellen; die dunkeln Stellen hielt man früher für Meere, und sie haben noch die ihnen damals gegebenen Meernamen; jetzt weiß

man, daß diese Maren mehr oder minder ebene Oberflächentheile sind. Die hellen Stellen sind Gebirgslandschaften; man unterscheidet gewöhnliche Gebirge und Ringgebirge; die gewöhnlichen Gebirge sind unregelmäßig neben einander gelagerte Massen mit kuppelförmigen Gipfeln und steilen unregelmäßig gezogenen Thälern; die Höhen hat man gemessen aus der Länge der Schatten, aus der Entfernung eines in dem dunkeln Mondtheile schon hell erscheinenden Gipfels von der Lichtgrenze, und endlich aus der Länge der Zacken am Mondrande; der Kaukasus hat Gipfel von 18000, die Apenninen von 17000′. Höher noch sind die Ringgebirge, ringförmige Wälle um Ebenen (Fig. 374) oder Centralberge gezogen bis zu 30 M. Durchmesser, aber auch von unmeßbarer Kleinheit; man unterscheidet Wallebenen, Ringgebirge und Krater. Merkwürdig erscheinen die Rillen, bis 30 M. lange Gruben, und die Strahlensysteme, zur Zeit des Vollmondes von manchen Ringgebirgen strahlenartig ausgehende sehr helle Lichtlinien. Während man früher die vulcanische Thätigkeit des Mondes für erstarrt hielt, hat Schmidt seit 1866 am Krater Linné und 2 anderen Kratern Veränderungen beobachtet, die er für ein Ausfüllen und Ueberfließen der Krater hält, und Klein hat 1877 in der Nähe des Kraters Higinus einen neuen, großen, schattenerfüllten Krater ohne Wall und 1878 zwischen den Ringgebirgen Beaumont und Theophilus (Fig. 374) den neuen Vulkan N mit Krater und Wall entdeckt.

Fig. 374.

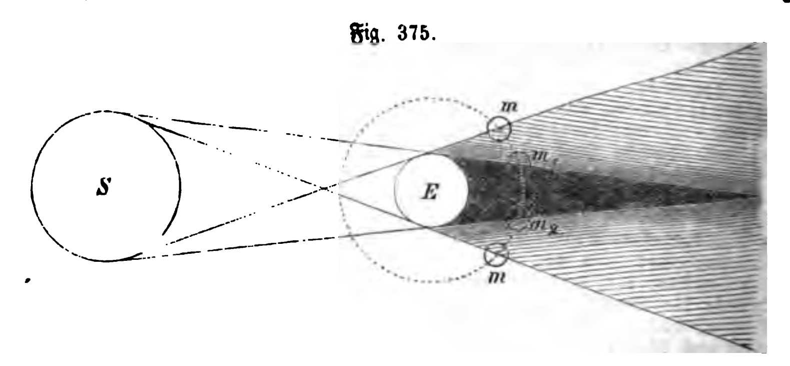


Für die Abwesenheit oder unmerkbare Verdünntheit einer Atm. führt man folgende Gründe an: An den Mondrand heranrückende St. zeigen weder eine Schwächung des Lichtes, noch eine Veränderung in der Stellung, wie sie die Brechung der Sternstrahlen durch die Mondatm. hätte herbei führen müssen, noch auch (Huggins 1865) eine neue Spectrallinie, oder einen dunkeln Spectralstreifen, wie sie von einer Atm. hervorgerufen werden; ebenso stimmt das Spectr. des Mondlichtes vollkommen mit dem Sonnensp. Die Schatten der Gebirge sind so schwarz, wie sie durch Luft gesehen nicht erscheinen könnten. Nie sind Wolken oder ähnliche starke Trübungen auf der Mondscheibe wahrgenommen worden. (Indessen führt Neison in seinem Werke „The Moon“ (1878 von Klein deutsch herausgegeben) Gründe an, welche zur Annahme einer Atm. von etwa 1/300 der Dichte unserer Luft drängen; außerdem beweise die Oberflächenbeschaffenheit des Mondes, daß die Luft früher dichter und daher auch Wasser vorhanden gewesen und daß beide chemisch oder mechanisch von der Mondrinde aufgenommen seien, wie ja auch die Erdrinde Gase und Wasser in festem Zustande enthalte; das mechanisch gebundene Wasser erkläre die manchmal auftretenden schwachen Trübungen, und die grüne Farbe mancher Mondstellen sei nur durch eine Art von Vegetation erklärlich). Wenn nun auf dem Mond so gut wie keine Luft ist, so kann auch kein Wasser vorhanden sein, weil im luftleeren Raume das Wasser bei der niedrigsten Temp. kocht; dafür sprechen auch die Thatsachen, daß die Mondgebirge steil abfallen, keine verzweigten Thalbildungen aufweisen, und daß auf dem Monde alle Oberflächentheile durch die besten Fernrohre in wilder Zerklüftung erscheinen, die durch den starken Wechsel der Temp. in dem langen, heißen Mondtage und der ebensolangen kalten Mondnacht erklärlich ist. Zur Zeit, als man die Abwesenheit von Wasser noch nicht vermuthete, hielt man die dunkeln Flecken für Meere, weil glatte Oberflächen das Licht nur nach einer Richtung reflectiren und daher in allen anderen Richtungen dunkel erscheinen müssen, während rauhe Flächen das Licht nach allen Richtungen hin zerstreuen und daher von allen Seiten hell erscheinen; aus denselben Gründen hielt man die dunkeln Stellen nachher für Ebenen, und fand diese Ansicht bei späterer genauerer Untersuchung bestätigt,

obwohl sie sich sehr häufig als ziemlich uneben herausstellten. Die größten sind der Oceanus procellarum (9000 Q.-M.) auf der Osthälfte, und auf der Westhälfte die zusammenhängenden mare serenitatis, mare tranquillitatis, mare fecunditatis, mare nectaris. Auch in diesen Gebilden tritt schon die den Mond beherrschende Kreisform auf, die in den Wall-ebenen, großen, von einem Walle umschlossenen Ebenen, den kleineren Ringgebirgen mit den zahllosen kleinen Kratern, sowie selbst in den gewöhnlichen Gebirgen überall vorkommt; jedoch verschwindet in den besten Fernrohren die Ringform mehr und mehr. Die Wälle der Ringgebirge sind häufig innen und außen von Terrassen umlagert, von Kuppen und Schluchten unterbrochen, innen tiefer als außen, so daß der öfter vorkommende Central-berg häufig nicht die Höhe der äußeren Landschaft erreicht. Nach Schmidt erreicht eine Kuppel im Walle des Curtius die Höhe von mehr als 27 000′, die höchste Erhebung auf dem Monde; die Wälle gehen oft über 20 000′ Höhe hinaus, während der Durchmesser der Ringgebirge und Wallebenen 7—31 M. erreicht, so daß ganze Länder in einem solchen Ringe Platz hätten. Die Krater sind in ungeheurer Anzahl in den südlichen Theilen des Mondes verbreitet, bald isolirt, bald mehr zusammen, ja perlschnurartig an einander gereiht, mit gesprengten Thoren, von unergründlicher Tiefe. — Die Gesammtzahl der Rillen beläuft sich bis jetzt auf bald 500, Schmidt hat allein an 300 aufgefunden und untersucht. In den Phasen erscheinen sie als dunkle, im Vollmonde als helle Linien, sie sind Risse, Spalten in der Mondfläche bis zu 30 M. Länge, bis zu 1/2 M. Breite und 1000′ Tiefe; manchmal durchsetzen sie Krater oder endigen an solchen; sie sind vielleicht die Reste ehemaliger Fluß-thäler. — Die Strahlensysteme sind weder Erhöhungen noch Vertiefungen, da sie bei schiefer Beleuchtung keine Spur von Schatten zeigen, sondern ganz verschwinden, und erst beim Vollmonde als helle Streifen von 0,2 bis 4 M. Breite und oft mehr als 100 M. Länge von manchen Ringgebirgen aus in großer Zahl durch alle Mondgebilde hinziehen; ihr Wesen ist unbekannt.

576 **Die Finsternisse.** Eine Mondfinsterniß (Fig. 375) ist der Eintritt des Vollmondes in den Erdschatten; sie kann sich nur ereignen, wenn der Vollmond in oder nahe bei einem Knoten stattfindet. Man unterscheidet totale und partiale Mondfinsternisse; bei einer totalen Finsterniß tritt die ganze Mondscheibe in den Schatten, verschwindet aber gewöhnlich nicht, sondern erscheint nur sehr dunkel roth. Bei der letzten totalen Mondfinsterniß (1884) war der Mond längere

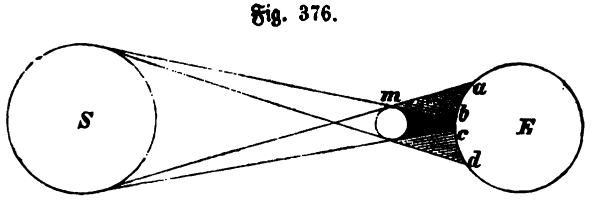
Fig. 375.



Zeit ganz unsichtbar. — Eine Sonnenfinsterniß (Fig. 376) ist eine ganze oder theilweise Verdeckung der Sonne durch den Neumond; sie findet nur statt, wenn der Neumond in oder nahe bei einem Knoten eintritt. Man unterscheidet totale, partiale und ringförmige Sonnenfinsternisse. Während bei einer Mond-finsterniß der verfinsterte Mond oder Mondtheil gewöhnlich nicht ganz verschwindet, ist bei einer Sonnenfinsterniß die Sonne ganz oder theilweise absolut unsichtbar, so daß bei einer totalen Sonnenfinsterniß nur ein Strahlenkranz oder die Corona und einzelne hoch emporschießende glühende Wasserstoffsäulen als Protuberanzen an dem Mondrande übrig bleiben. Während eine Mond-finsterniß ziemlich gleichzeitig von Allen erblickt wird, die sie sehen können, wird eine Sonnenfinsterniß im Osten oft viele Stunden später als im Westen ge-

sehen. Während eine totale Mondfinsterniß stundenlang dauern kann, beträgt die Dauer der Totalität bei einer Sonnenfinsterniß noch nicht 10 Min. Während eine Mondfinsterniß von allen bemerkt wird, die den Mond sehen, ist eine Sonnenfinsterniß nur für die Erdzone sichtbar, über welche der Mondschatten hinläuft; die Punkte (a b und cd), welche im Halbschatten des Mondes liegen, haben partiale Sonnenfinsterniß, die im Kernschatten liegen (bc), totale, die nur von der Verlängerung des Kernschattens getroffenen Punkte ringförmige Sonnenfinsterniß. Während in 18 Jahren nur 29 Mondfinsternisse vorkommen, sind in derselben Zeit für die ganze Erde 41, für denselben Ort aber nur etwa 10 Sonnenfinsternisse möglich.

Fig. 376.



Wenn die Mondbahn mit der Ekliptik zusammenfiele, so würde bei jedem Neumonde eine Sonnenfinsterniß und bei jedem Vollmonde eine Mondfinsterniß stattfinden, weil dann die 3 Weltkörper bei den Syzygien immer in gerader Linie ständen, der Neumond uns dann immer die Sonne verdecken und der Vollmond in den Erdschatten treten müßte. Da aber die Mondbahn mit der Ekliptik einen Winkel von 5° bildet, so kann der Mond über oder unter der Verbindungslinie von Erde und Sonne vorbeigehen, ohne eine Finsterniß zu erzeugen; eine solche kann demnach nur entstehen, wenn Neu- oder Vollmond in oder nahe bei der Ekliptik stehen, d. h. wenn dieselben in oder nahe bei einem Knoten stattfinden. Die Knoten wandern nun bekanntlich in 19 Jahren durch die ganze Ekliptik herum, daher wiederholen sich nach Ablauf dieser Zeit die Finsternisse ziemlich in derselben Weise, woraus schon bei alten Völkern diese Erscheinungen vorherbestimmt wurden. Doch braucht der Mond nicht genau in dem Knoten selbst zu stehen, um Finsternisse möglich zu machen; denn der Erdschattenkegel ist mehr als 180 000 M. lang, also in dem Mondabstande noch ca. 1200 M. dick, so daß er den nur 400 M. dicken Mond noch total, noch öfter aber partial verfinstern kann, ohne daß die Mittelpunkte zusammenfallen; ebenso tritt für die Sonnenfinsternisse der günstige Umstand ein, daß der verdeckende Körper, der Mond uns 400 mal näher ist als die Sonne, und daß ein kleiner Körper einen großen um so leichter unserm Auge entzieht, je näher der kleine uns ist im Vergleiche mit dem großen. Aus diesen Verhältnissen ergibt sich, daß eine Mondfinsterniß noch möglich ist, wenn der Vollmond 13° vom Knoten entfernt ist, und daß dieselbe Entf. für die Sonnenfinsternisse gar 20° beträgt, woraus die Zahl der Sonnenfinsternisse innerhalb der Periode von 18 Jahren sich ergibt. Nach Ablauf derselben treten trotz der Wiederkehr der Knotenerscheinungen die Finsternisse nicht genau wieder in derselben Art und Folge auf, weil die Entfernungen der Sonne und des Mondes von der Erde nicht in denselben Perioden wiederkehren wie die Knoten, und doch von wesentlichem Einflusse sind. So kann die Länge des Mondschattens hierdurch 49 000—51 000 M. werden, während die Entf. des Mondes 48 000—54 000 M. beträgt; deßhalb kann der Mondschattenkegel noch von der Erdoberfläche geschnitten werden, er kann aber auch die Erde nur eben mit seiner Spitze berühren, und kann endlich auch die Erde nicht einmal mit seiner Spitze erreichen. Im ersten Falle fällt auf die Erde ein dunkler Schattenkreis, der Kernschatten, umgeben von einem immer heller werdenden halbdunkeln Kreise, dem Halbschatten, welche mit einander wie der Mond selbst von Westen nach Osten über die Erde hinziehen; wer in den Kernschattenstreifen fällt, hat totale Sonnenfinsterniß, weil in den Kernschatten von keinem Theile des leuchtenden Körpers Licht gelangt; wer in dem Halbschatten liegt, hat partielle Finsterniß, weil der Halbschatten von Theilen des leuchtenden Körpers Licht erhält. Im zweiten der drei Fälle haben nur die Punkte einer Linie eine totale Finsterniß ohne Dauer; im dritten Falle entsteht nur partielle Finsterniß; den Orten aber in der Verlängerung des Kernschattens ist nur der mittlere Theil der Sonne durch den Mond verdeckt; denn dieser Schattenfall tritt ein, wenn der Mond weiter entfernt und die Sonne näher ist als gewöhnlich, so daß der Mond, der uns gewöhnlich an Größe der Sonne gleich erscheint, nun kleiner ist als diese und daher einen ringförmigen Raum der Sonne rings um seine dunkle Scheibe sichtbar läßt; ein solcher Lichtring, mehr oder weniger regelmäßig, ist für alle Erdpunkte sichtbar, die von der Verlängerung des Kernschattens getroffen werden. Der durch den Mond zugedeckte Theil der Sonne ist natürlich völlig unsichtbar; bei einer Mondfinsterniß aber werden durch die Atmosphäre der Erde Sonnen-

strahlen in den Schattenraum hineingebrochen; deßhalb ist der Halbschatten nicht dunkel und der Eintritt des Mondes in den Halbschatten kaum merklich; deßhalb verschwindet auch der Mond bei der Totalität nicht, sondern erscheint roth, weil jene gebrochenen Strahlen ihre blauen Bestandtheile in der Erdluft zurückgelassen haben. Bei totalen Sonnenfinsternissen wird es indessen ebenfalls nicht ganz Nacht, weil noch viel diffuses Licht in der Luft ist, und weil die Protuberanzen und die Corona noch leuchten; indessen werden doch helle Sterne sichtbar und treten andere Nacht- und Kälteerscheinungen in der Natur auf. Seit man die Protuberanzen bei Sonnenschein beobachten kann, bieten die Sonnenfinsternisse nur noch zur Untersuchung der Corona, zur Beobachtung etwaiger intramercuriellen Planeten und vielleicht des Zodiakallichtes astronomisches Interesse; auch benutzt man sie zu Längenbestimmungen.

6. Die Asteroiden und die Kometen.

579 Die Asteroiden sind ganz kleine Weltkörper, bis zur Staubgröße herab, die einzeln sowie in Schwärmen und Ringen um die Sonne gehen. Sie treten in 3 Arten auf, als Sternschnuppen, Feuerkugeln und Meteorite. Meteorite heißen sie, wenn sie vom Himmel niedergefallen auf der Erde gefunden werden, und zwar werden sie Meteorsteine genannt, wenn sie vorwiegend aus Silicatmassen bestehen, aber arm an Eisen sind, Meteoreisen dagegen, wenn sie vorwiegend gediegenes Eisen enthalten, das gewöhnlich von Nickel und Kobalt begleitet ist. Feuerkugeln heißen sie, wenn sie als roth leuchtende Kreisscheiben von bedeutender Größe sich rasch am Himmel hinbewegen, wobei sie öfter einen feurigen Schweif zurücklassen, manchmal auch mit mehr oder weniger lauter Detonation zerplatzen; bei Tage treten sie als dunkle Wölkchen auf. Sternschnuppen heißen plötzlich auftauchende, meist weiße sternartige Funken, die rasch am Himmel hinschießen und plötzlich wieder verschwinden. Die mittlere Dauer der Sternschnuppen ist ½ Sec., die Länge ihrer Bahn 12—16°, ihre Höhe durchschnittlich 8 M., ihre Geschwindigkeit 4—20 M., die Zahl der täglich auf der ganzen Erde mit bloßem Auge sichtbaren nach H. Newton 7½ Millionen. Man theilt sie ein in sporadische und periodische Sternschnuppen; die ersteren erscheinen einzeln und zu beliebigen Zeiten, die letzteren in großen Schaaren zu bestimmten Zeiten und gehen von bestimmten Punkten des Himmels, Radiationspunkten aus; sie bilden Sternschnuppenringe, wenn sie wie der Auguststrom jedes Jahr auftreten, Sternschnuppenschwärme, wenn sie wie der Novemberstrom erst nach mehreren Jahren wieder sichtbar werden. Die Zahl der sichtbaren Sternschnuppen ist nach Mitternacht größer als vorher. Manche Sternschnuppenschwärme haben dieselben Bahnelemente wie bestimmte Kometen, wodurch die Meinung entstanden ist, die Sternschnuppenschwärme und Kometen seien identisch (Schiaparelli 1866).

Der größte Meteorstein scheint der von Aegos Potamos (476 v. Chr.) zu sein, der zu Plinius Zeiten noch die Größe eines Wagens hatte; das größte Meteoreisen ist die Pallasmasse (1749) in Sibirien, deren Rest 1270 Pfd. schwer in Petersburg aufbewahrt wird. Jedoch ist diese Masse zackig und voll Höhlen, die von Olivin erfüllt sind, während in Südamerika Eisenmassen von 15000kg liegen, und die Schweden 1871 auf der Insel Disko eine in Basalt eingewachsene Eisenmasse von ca. 25000kg fanden, die jedoch auch für tellurischen Ursprungs gehalten werden. Manche sind in Kirchen aufbewahrt (das Ancile des Mars, die Kaaba zu Mekka, der Stein von Ensisheim), die meisten in der Wiener Sammlung und im British Museum. Häufig hat man die Meteorite nach der Detonation einer Feuerkugel oder (bei Tage) eines dunkeln Wölkchens niederfallen sehen; so war die Detonation von dem Falle des Ensisheimer Steines so stark, daß sie bis nach der Schweiz, Burgund und tief nach Frankreich hinein gehört wurde. Diese Detonation rührt offenbar von der Gluth her, und diese entsteht durch die Verdichtung der Luft, welche bei der ungeheuren Geschw. bis zu 20 M. sehr bedeutend ist, und bei welcher bekanntlich immer Wärme entsteht; diese Wärme ist die verwandelte leb. Kft., welche der Asteroid durch den Widerstand der Luft verliert. Die Geschw. berechnet man aus dem scheinbaren Wege und der Höhe, und diese Höhe aus der Parallaxe, d. i. aus dem Bogenabstande, unter welchem eine und dieselbe Sternschnuppe 2 Beobachtern an ziemlich von einander entfernten Orten, z. B. in Rom und Civitavecchia erscheint. Hinsichtlich der Zahl der sichtbaren Sternschnuppen be-

rechnet H. Newton in Newhaven (V. St.), daß man täglich 400 Mill. sehen würde, wenn man den ganzen Himmel gleichzeitig mit guten Fernrohren beobachten könnte. Morgens sieht man mehr Sternschnuppen, weil der Theil der Erde, für welchen die Sonne aufgeht, sich auf der Seite befindet, nach welcher sich die Erde in ihrer jährlichen Bahn bewegt, und weil in der Richtung des Voranschreitens die Erde auf mehr dieser Körper treffen muß, als auf der Rück- oder Abendseite sie treffen, wo sie sich von denselben zurückzieht; da indeß dennoch auch Abends Sternschnuppen gesehen werden, muß die Geschw. derselben durchschnittlich größer als 4 M., als die der Erde sein, ja aus der Menge der Abends und Morgens eintreffenden Sternschnuppen hat man die durchschnittliche Geschw. von 6 M. berechnet. Ein Sternschnuppenschwarm, der für sich oder als Kometentheil in unser Sonnensystem hereinkommt, und dessen Bahn durch die Anziehung eines Pl. solche Veränderungen erleidet, daß zwar nicht die Lagenelemente, aber die Formelemente der Bahn in mehr kreisähnlich elliptische umgewandelt werden, und der deßhalb in kürzeren Zeiten um die Sonne kreist, erfährt hierdurch auch Veränderungen in seiner eigenen Form durch das zweite Keppler'sche Gesetz, er zieht sich enger zusammen und mehr in die Länge, welch letzteres auch schon durch verschiedene Geschw. der einzelnen Theile möglich ist; so wird ein Schwarm allmälig in einen Ring umgewandelt, wie es mit dem Augustschwarme schon geschehen ist, wodurch wir jedes Jahr vom 10.—13. August viele Sternschnuppen sehen (Laurentiusstrom). Der Novemberschwarm ist nach Leverrier erst vor 1600 Jahren in unser Sonnensystem gekommen, hat durch den Uranus eine neue engere elliptische Bahn erhalten und kreist in 34 Jahren um die Sonne; er ist nur wenig in die Länge gezogen und nur einzelne Nachzügler oder Voreilige mögen schon die Bahn erfüllen; die Erde kommt jedes Jahr im November durch diese Bahn, man sieht daher jedes Jahr am 13. bis 15. Nov. mehr Sternschnuppen als gewöhnlich und alle 34 Jahre (1799, 1833, 1866 und 1868) so unzählig viele, als ob ein Feuerwerk von dem Sternbilde des Löwen (dem Radiationspunkte) aus losgebrannt würde. Indessen existiren noch manche andere Sternschnuppenschwärme, die noch weniger genau bekannt sind.

580 Die Kometen erscheinen zuerst als teleskopische Lichtnebel, welche in großer Entfernung von der Sonne, meist unvermuthet, auftauchen, mit großer Geschw. zwischen den Fixst. nach der Sonne zu wandern, um dieselbe herum gehen und auf der anderen Seite allmälig sich entfernen und verschwinden. Viele bleiben während ihrer Sichtbarkeit teleskopische Lichtwolken, nehmen jedoch bei ihrer Annäherung an Glanz zu und bei ihrer Entfernung wieder ab; in den mit blosen Augen sichtbaren zeigt sich dagegen allmälig ein mit der Sonnennähe an Glanz fortwährend zunehmender sternartiger Kern und entwickelt sich eine an Größe fortwährend zunehmende Lichtgarbe, der Schweif; der Kern nimmt häufig mit der Annäherung zur Sonne an Größe ab, während von ihm nach dem Schweife zu lebhafte Lichtströme auftreten; bei der Entf. von der Sonne nehmen der Glanz des Kernes und die Größe des Schweifes allmälig ab. Kern und Schweif sind demnach Nebenelemente eines K., die nicht immer auftreten; die Nebelhülle oder Koma dagegen ist wesentlich. Alle Theile sind so veränderlich, daß bei einer Wiederkehr der K. nicht an der Gestalt, sondern an den Bahnelementen erkannt wird; noch verschiedener sind die Gestalten der verschiedenen K. Alle Theile sind durchsichtig, brechen und schwächen das Licht der hinter ihnen stehenden St. nicht; sie müssen daher von höchst lockerer und geringer Masse sein; damit stimmt die Beobachtung, daß sie sogar auf die kleinsten Trabanten, an welchen sie nahe vorbeigehen, nicht die geringste Störung ausüben, während sie selbst durch solche die stärksten Bahnveränderungen erfahren; ja man vermuthet sogar, daß die Erde unvermerkt durch Kometenschweife hindurch gegangen sei. Im Gegensatze zur Masse ist die Größe der K. ungewöhnlich bedeutend, sie sind die größten Himmelskörper, der K. von 1843 hatte eine Länge von 30 Mill. M. Die Zahl der K. ist groß (nach Keppler der Zahl der Fische im Weltmeere zu vergleichen); jedoch wurden noch nicht ganz 700 (seit 468 v. Chr.) beobachtet, die älteren nur mit blosem Auge, in neuerer Zeit vorwiegend mit dem Fernrohre; in den letzten Jahrzehnten durchschnittlich jährlich 3 bis 4; von der angegebenen Zahl sind ca. 400 teleskopisch. Die Bahnen der K. sind Ellipsen von großer Exc., größer als 1/2, oft auch Parabeln und Hyperbeln, so daß viele K. aus dem Unendlichen (von einem anderen Fixst.) kommen, um die Sonne gehen

und auf der anderen Seite wieder ins Unendliche hinaus ziehen. Unter denen mit elliptischen Bahnen sind 12, welche in der durch die Rechnung bestimmten Zeit wiedergekehrt sind und dadurch die Richtigkeit der berechneten Bahnelemente beweisen; für etwa 50 wurden so lange Umlaufszeiten berechnet, daß die Rückkehr bis jetzt nicht beobachtet werden konnte, 10 haben hyperbolische und die übrigen berechneten parabolische Bahnen. Die Richtung der Kometenbewegung ist ebenso oft rückläufig wie rechtläufig, die Neigung hat die verschiedensten Größen. Wegen der großen Exc. der ell. Bahnen kommen die K. im Perihel der Sonne sehr nahe und entfernen sich im Aphel sehr weit; daher ist ihre Geschw. sehr verschieden, steigt im Perihel bis an 100 M. und sinkt im Aphel auf wenige Meter. Da die K. nur in der Nähe der Sonne sichtbar sind und sich hier so rasch bewegen, so sehen wir sie nur kurze Zeit, höchstens einige Monate. Seit 1866 ist von Schiaparelli u. A. eine Uebereinstimmung der Bahnelemente von K. mit den Bahnelementen von Sternschnuppenschwärmen nachgewiesen worden. Hierdurch ist die Meinung entstanden, die K. seien entweder selbst Asteroidenschwärme oder Theile von solchen. Nach Zöllners (1871) Kometentheorie, die eine weitere Ausbildung der Ansichten von Olbers und Bessel ist, bestehen indessen die Nebelhülle und der Schweif nicht, wie der Kern, aus Sternschnuppen oder festen Theilchen, sondern aus feinem Dunst, der sich in der Sonnennähe durch deren Wärme entwickelt und, von der Elektricität der Sonne abgestoßen, hinter den Kern strömt, den Schweif bildet und durch seine eigene Elektricität leuchtet. Mit dieser Hypothese lassen sich die Ergebnisse der Spectralanalyse noch nicht ganz vereinigen, indem das vorwiegend auftretende Kometenspectrum die drei Banden der elektrisch leuchtenden Kohlenstoffverbindungen zeigt; dies leitet zu der Vermuthung, daß der Hauptbestandtheil der Kometen selbstleuchtender Kohlenwasserstoff sei, während der helle Kern auch noch ein continuirliches Spectrum hat, gegen das bei großer Helligkeit das Dreibandenspectrum verschwindet, während bei schwachem Kerne und in der Coma das continuirliche Spectrum unsichtbar wird. Wenn auch diese Verschiedenheiten noch erklärlich scheinen, so hält man es doch für unverträglich mit der Zöllner'schen Theorie, daß der Schweif ein continuirliches Spectrum hat und hierdurch wie durch sein polarisirtes Licht zu der Annahme zwingt, daß er in reflectirtem Sonnenlichte leuchtet.

Schiaparelli beobachtete (1866), daß die Bahnelemente des Augustschwarmes dieselben sind wie die des Kom. III (1862), und daß die des Novemberschwarmes übereinstimmen mit den El. des K. I (1866), wonach Weiß noch mehrere solcher Uebereinstimmungen auffand. Aus dieser Gleichheit der Elemente folgt indeß keineswegs die Identität der betreffenden K. mit den erwähnten Schwärmen, da dieselben in der Epoche verschieden sind, also wohl auf denselben Bahnen aber an verschiedenen Stellen derselben wandeln; außerdem sieht ein Kometenschweif eben nicht aus wie ein zerstreuter Haufen von Steinen, weder durch die optischen Instrumente, noch für das blose Auge, wie ein Blick auf Fig. 377 lehrt, welche den schönen K. von Coggia (1874) darstellt. Indessen mögen doch die teleskopischen K. aus solchen Haufen zerstreuter Asteroiden bestehen; denn nachdem man am 27. Nov. 1872 einen starken Asteroidenschwarm aus einer Himmelsrichtung hatte auf die nördl. Erdhälfte zukommen sehen, vermuthete Klinkerfues, dieser Schwarm könnte nach einiger Zeit von der südl. Seite der Erde aus in entgegengesetzter Himmelsrichtung als K. erscheinen; er gab eine telegraphische Anweisung nach Madras, und der K. wurde am bezeichneten Orte gefunden. Hieraus und aus der erwähnten Gleichheit der Bahnenelemente folgt die Wahrscheinlichkeit, daß wenigstens auch die Kerne größerer K. eine Art Asteroidenschwärme seien, daß die K. und die gewöhnlichen Schwärme denselben Ursprung haben, daß z. B. der Schwarm vorwiegend die größeren festen Massen eines früheren Gestirnes in weit von einander entfernte Stücke vertheilt enthält, während der Kometenkern vielleicht die kleineren Massen mit den Flüssigkeiten, die in der Kälte des Weltraumes ebenfalls fest sein müssen, in größerer Nähe vereinigt in sich faßt. Wenn nun ein solcher Körper in die Nähe der Sonne gelangt, so muß in dem luftleeren Weltraume die Sonnenwärme die verdunstungsfähigen Bestandtheile desselben in Dampf

verwandeln, der wegen der geringen Gravitation des massenarmen Kernes und wegen der großen mol. Bewegung der Gase, auf die keine Spur von Luftdruck wirkt, sich mit großer Geschw. in einen ungeheuren Raum ausbreiten muß und nur eine verschwindend kleine Dichtigkeit annehmen kann. Dieser Dunst bildet die Nebelhülle und den Schweif; die unendliche Feinheit desselben erklärt die Durchsichtigkeit und den Mangel des Lichtbrechungsvermögens in Bart und Schweif; für den Kern folgen diese Eigenschaften aus seiner siebartigen Zusammensetzung aus zerstreuten Massen. Die ungeheure Geschw. erklärt das große Vol. der K. und die in denselben wahrgenommenen Strömungen, die auch der Fig. 377 entsprechen; aus der mit wachsender Annäherung an die Sonne steigenden Verdunstung erklärt sich die rasche Zunahme des Schweifes und die Abnahme des Kernes. Die Zunahme des Glanzes des Kernes erklärt sich aus der größeren Menge des in größerer Sonnennähe reflectirten Lichtes; denn der Kern leuchtet in reflectirtem Sonnenlichte, was sowohl aus der Polarisation seines Lichtes als aus dem cont. Sp. desselben erhellt. Indessen haben nicht alle Kometenkerne ein cont. Sp., sondern manchmal nur das Dreibandensp.; dies erklärt sich daraus, daß in einem cont. Sp. das Licht auf alle Stellen eines langen Bandes vertheilt ist, daß also ein schwaches Licht zur hinreichenden Erhellung desselben nicht ausreicht. Im Streifen- oder Bandensp. dagegen ist das Licht auf einige Stellen concentrirt, wodurch auch ein schwaches Licht schon zur Erzeugung des Sp. genügt; daher haben manche Kometenkerne, wie auch die teleskopischen K. häufig nur das Dreibandensp., da der selbstleuchtende Dunst der Schweife natürlich auch in dem Kerne vorhanden ist. Das Selbstleuchten des Dunstes erklärt man durch die El. desselben, welche in den leeren Raum bekanntlich mit sanftem Leuchten ausströmt, wie das Leuchten des Barometer-Vacuums und der Geißler'schen Röhren zeigt. Ob diese El. durch die Verdunstung erst entsteht oder ob in jedem Himmelskörper freie El. angenommen werden muß, wie die Erde freie neg. El. enthält, muß noch dahin gestellt bleiben. Die El. erklärt auch die Gestalt und die von der Sonne abgewandte Richtung des Schweifes. Die Verdunstung muß nämlich an der der Sonne zugewandten Seite des Kernes am stärksten stattfinden; daher beobachtet man lebhafte Strömungen vom Kerne nach der Sonne zu, indem immer neue Dämpfe den ausgeströmten nachfolgen. Ist nun die Sonne ebenso el. wie der Dunst des Schweifes, so wird, da gleiche El. sich abstoßen, die Sonne den Dampfstrahl zurücktreiben, er muß sich in etwa parabolischer Krümmung rückwärts biegen und hinter den Kern strömen (Fig. 377). Uebt der K. ebenfalls eine Abstoßung aus, so kann auch ein nach der Sonne zugewandter Schweif, ein Bart, entstehen; entwickeln sich mehrere Dünste, die sich abstoßen, so können auch mehrere Schweife sich bilden, wie in dem K. von 1842, der 2, und dem von 1741, der 6 fächerartig gestellte Schweife hatte; auch 1877. b. hatte 2 Schweife. Bis die Dunstmassen in den Schweif gelangt sind, können sie wegen der Kälte von 200° im Weltraume besonders an den Schweifrändern theilweise condensirt sein und so Staubtheilchen bilden, die in reflektirtem Sonnenlichte leuchten und das cont. Sp. und die Polarisation des Schweiflichtes bewirken mögen; der Dunst wird zu Staub, weßhalb dem Schweife das Dreibandensp. fehlt. Das Zerstreuen des Dunstes im Weltraume erklärt die Abnahme des Schweifes bei der Entf. von der Sonne, seine Verschiedenheit bei verschiedenen Wiederkehren und die allmälige Erschöpfung desselben; Halleys K., der im Mittelalter die Welt in Schrecken versetzte, war bei seiner letzten Erscheinung (1835) nur teleskopisch. Ebenso können aber auch die festen Massen sich nach Kepplers Gesetzen oder von nahen Planeten angezogen zerstreuen, wodurch das völlige Verschwinden von Kometen erklärlich wird, oder

Fig. 377.



ihre Umwandlung in einen Asteroidenschwarm, wie der verloren geglaubte Biela'sche Komet 1872 als Sternschnuppenschwarm wieder erschienen ist.

Merkwürdige Kometen. Die 12 periodischen K., mit berechneter und beobachteter Wiederkehr sind nach den Umlaufszeiten geordnet: 1. Der **Encke'sche K.**, Umlaufzeit 3,3 Jahre, die kürzeste von allen; die kleinste Bahn, deren Aphel noch innerhalb der Jupiterbahn; schon 21mal wiedergekehrt, aber jedesmal $2^2/_3$ St. früher; man erklärt dies dadurch, daß die Anziehung im Verhältnisse zur leb. Kft. größer wird, weil die letztere durch den Widerstand des Aethers eine Verminderung erfährt. 2. **De Vicos K.** (1844); Umlaufz. $5^1/_2$ J.; wegen zu großer Sonnennähe nicht wieder gesehen worden. 3. **Winneckes K.** (1858); Uml. 5,56 J.; 1869 und 1875 erschienen. Nach Oppolzer erfährt die Umlaufzeit Verkürzungen, die sich nicht durch Planetenstörungen erklären lassen, sondern wie bei Encke durch ein widerstehendes Medium, den Aether, dessen Widerstand O. fast ebenso groß findet, wie Asten aus Enckes K. 4. **Brorsens K.** (1846); Uml. 5,6 J.; 4mal gesehen. Vor der für 1884 erwarteten Wiederkehr berechnete Prof. Schultze, daß während der 6 Umläufe von 1846—79 durch Planetenstörungen die Umlaufzeit von 2034 auf 1995 Tage zurückgegangen ist. Im Jahre 1937 soll ihm nach d'Arrest das Schicksal des Kom. Lexell bevorstehen, und erst 1842 soll er seine jetzige kurze Umlaufzeit erhalten haben. 5. **Tempels K.** (1867); Uml. 6 J.; 1873 und 79 wieder gesehen. 6. **D'Arrests K.** (1851); Umlauf $6^1/_2$ J.; 3mal erschienen; durch Störungen ist die Umlaufz. seit 1851 um 104 T. gewachsen. 7. **Bielas K.** (1826); 6,7 J. Uml.; ist dadurch merkwürdig, daß er bei der 4. Wiederkehr in 2 ziemlich gleiche Theile gespalten war, die ungefähr 40 000 M. von einander abstanden, daß bei der 5. Erscheinung (1852) die 2 Theile 300 000 M. von einander entfernt waren, und daß er dann ganz verschwand, bis er 1872 als Asteroidenschwarm und in Folge dessen auch als K. wieder gesehen wurde. 8. **Fayes K.** (1843); Umlaufz. 7,4 J.; die kleinste Exc. = 0,55 unter allen K.; 5mal wiedergekehrt. 9. **Bruhns' K.** (1858); Uml. 13,7 J.; 1871 beobachtet. 10. Der Komet **Gould-Meyer**, 1880 von Gould entdeckt und von Meyer eine Umlaufzeit von 37 J. berechnet; er scheint mit dem großen K. von 1843 identisch zu sein, der fast nur Schweif von 30—40 M. M. Länge und selbst bei Tage sichtbar war; denn er hatte dieselbe gerade, langgestreckte Gestalt und kam der Sonne wie jener 20 000 M. nahe. Durch diese unerhörte Sonnennähe sind Störungen (des Meteoritenringes) sehr wahrscheinlich; Klinkerfues meint, daß die früheren Umlaufzeiten größer gewesen seien und die folgenden kleiner werden dürften; wirklich hat Boguslawski eine größere Zahl von ähnlichen K. namhaft gemacht, die auf den K. von 1843 bezogen, Umlaufzeiten gleich 4.37 Jahren zeigen. Weiß hält dagegen die seltene Sichtbarkeit dieses K. von 37 J. Umlaufzeit für eine Folge seiner südlich gelegenen Bahn. 11. Der K. **Pons-Brooks** wurde 1812 von Pons entdeckt; Encke berechnete eine Umlaufzeit von 71 J. 4 M., die durch die zweite Entdeckung von Brooks (1883) bestätigt worden ist. Dieser Komet ist der Gegensatz des vorigen, da er fast nur Kern ist, als Stern erschien; zweimal zeigte er starke Lichtausbrüche. 12. **Halleys K.**; Uml. 77 J.; der erste K., dessen Wiederkehr vorausberechnet wurde, und von dem sich dann 17 Erscheinungen von 12 v. Chr. bis 1835 nachweisen ließen. Bessel beobachtete 1835 Strömungen und Pulsationen. Andere interessante K. sind: **Lexells K.**: kam 1767 dem Jupiter so nahe, daß seine vorher sehr große Umlaufzeit in eine 6jährige umgewandelt wurde, ging aber nach seinem 3ten Perihel auf seiner Rückkehr 1773 an einem Jupitermond ganz nahe vorbei, ohne diesen zu stören, während er wieder eine große Umlaufzeit erhielt; hierbei kam er auch der Erde so nahe, daß er den Tag derselben um einige Sec. hätte ändern müssen, wenn seine Masse nur $^1/_{10000}$ der Erdmasse betragen hätte; sein Dm. betrug ohne den Schweif 44000 M., woraus man berechnete, daß seine Dichte kleiner als $^1/_{20000}$ der Luftdichte ist. — Der K. von 1811, bei Tage sichtbar, beobachtet von Olbers, gab die Grundlage zu Zeuners Theorie. — Der K. von 1860

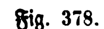


Fig. 378.



Schweif von 80° Länge; Aphel 18 000 M. M.; Perihel 130 000 M.; Geschw. zwischen 4 m und 79 M.; Exc. nahezu = 1; rückläufig. — Donatis K. (1858) glänzte fast so hell wie Arctur, verkleinerte stark seinen Kern bei Annäherung zur Sonne; Uml. 2500 J.; hatte 2 Nebenschweife; prächtiges Gestirn. — Coggias K. (1874) (Fig. 377) entschied die vorher zweifelhaften Spectra und die Polarisation; Uml. 12 000 J. — Im J. 1880 waren außer dem Gould'schen, dem Faye'schen und dem nicht sichtbar gewordenen von Winnecke noch 5 K. an unserem Himmel, im J. 1881 außer dem Encke'schen noch 6, von denen 2 mit bloßem Auge sichtbar wurden; Komet III (Fig. 378) zeigte einen fixsternartigen Kern mit fächerförmigen Lichtausströmungen; im cont. Sp. des Kerns verschwand das Dreibandensp., war jedoch in der Coma sichtbar und erstreckte sich in die nächsten Theile des Schweifes. Im J. 1882 zeigte der K. I bei der Annäherung an die Sonne eine Lichtzunahme und im Sp. verschwanden die gewöhnlichen Banden, während die gelbe Na-Linie mit besonderer Helligkeit erschien, wodurch die elektrische Natur des Kometenleuchtens dargethan scheint. Im September erschien der Komet III, wie I mit bloßem Auge sogar bei Tage in der Sonnennähe sichtbar und zeigte bei seinem Weggange von der Sonne den umgekehrten Wechsel des Sp.; er hatte in der Sonnennähe die Na-Linie, die bei wachsender Entf. schwächer wurde und dem Dreibandensp. Platz machte; die beiden K. hatten also in der Sonnennähe el. leuchtende Na-Dämpfe entwickelt; der Septemberkomet bildete auch in der Sonnennähe einen Kerneinschnitt und löste eine Anzahl von Lichtwolken und Nebelröhren von sich ab, zeigte also das Schauspiel einer Kometenzertrümmerung.

7. Chronologie.

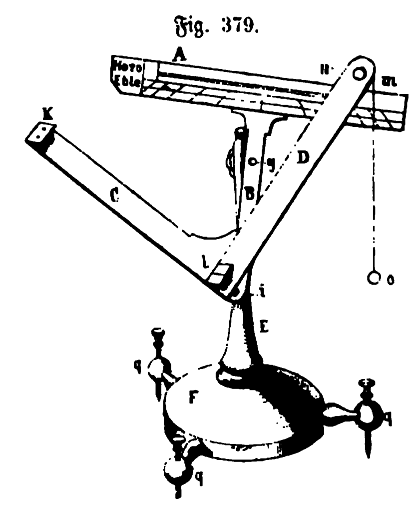
Zeitbestimmungen. Die Astronomie hat die Aufgabe, für jeden beliebigen Ort und für jede beliebige Zeit die Stellung der Himmelskörper zu berechnen, dann umgekehrt, zu finden, zu welcher Zeit ein Gestirn eine bestimmte Stellung einnimmt, wann z. B. für jeden beliebigen Ort an einem bestimmten Tage die Sonne aufgeht, culminirt, untergeht, welche Länge der Tag hat und endlich aus der Stellung eines Gestirnes die Zeit zu berechnen. Diese Aufgaben erfordern meist die Anwendung der sphärischen Trigonometrie. Eine einfachere Aufgabe ist die Beobachtung der wahren Zeit, aus der man dann durch Zufügung der Zeitgleichung die mittlere, d. i. die bürgerliche Zeit finden kann. Die Bestimmung der wahren Zeit geschieht auf ungenaue Art durch Sonnenuhren, durch Beobachtung des wahren Mittags mittels eines Gnomons, genauer durch Beobachtung der Sonnenculmination mittels eines Fernrohres, am genauesten durch Beobachtung der Culmination eines Sternes, dessen Elemente man genau kennt. Hiernach müssen selbst die genauest gehenden Uhren, die Chronometer, welche die Zeit nur durch mechanische Vorrichtungen dem Himmel nachahmen, corrigirt werden. 581

Die Sonnenuhr besteht aus einer zur Weltachse parallelen Linie, welche entweder durch einen Stab oder durch die obere Kante einer verticalen Messingplatte dargestellt ist und ihren Schatten auf eine hor. oder vert. Grundplatte wirft; wegen der großen Entf. der Sonne kann diese parallele Linie als die Weltachse selbst angesehen werden; und da die Sonne sich jeden Tag in gleicher Weise um die Weltachse dreht, jeden Tag zu derselben Zeit wieder dieselbe Stellung zur Weltachse hat, so muß auch die parallele Linie jeden T. zu derselben Zeit ihren Schatten nach derselben Richtung werfen, so daß man aus der Stellung des Schattens die Zeit erkennen kann.

Der Gnomon oder Sonnenzeiger ist ein verticaler Stab, der durch die Länge seines Schattens die Zeit in ungenauer Weise angibt, aber den Augenblick des wahren Mittags bei guter Einrichtung ziemlich scharf anzeigt, da in diesem Augenblicke, der Zeit des höchsten Sonnenstandes, der Schatten am kürzesten ist. Berühmte Sonnenzeiger sind der Obelisk von mehr als 100′ Höhe, den Kaiser Augustus aus Aegypten nach Rom bringen ließ, der Gnomon im Dome zu Florenz (1467), bestehend aus einer in 277′ Höhe in der Kuppel angebrachten Oeffnung, durch welche ein Sonnenbildchen auf den Fußboden fiel, das wegen der großen Höhe eine starke Bewegung hatte und daher größere Genauigkeit bot; geht von der Oeffnung ein Loth herab bis auf den Boden, so gibt die Verbindungslinie von dessen Fußpunkte mit dem Sonnenbildchen auch die Mittagslinie, die Richtung des Meridians an. — Eine genauere Bestimmung des wahren Mittags ist möglich mittels eines im Meridian aufgestellten Fernrohres, des sogenannten Mittagsrohres; der Moment, in welchem die Sonne, genauer der Mittelp. der S. im Schnittpunkte des Fadenkreuzes steht, ist der wahre Mittag.

Auch wenn ein Fernrohr nicht im Meridian steht, aber um eine vert. Achse drehbar ist, kann es zur Bestimmung des wahren Mittags dienen; man beobachtet die 2 Zeiten, in welchen die S. durch das Fernrohr geht; die Mitte derselben ist der wahre Mittag. Da aber die S. keine so scharfe Beobachtung der Culmination erlaubt als ein St., so benutzt man zur genauesten Zeitbestimmung einen Fixst. Bekanntlich liegt der Sternzeit der Frühlingspunkt zu Grunde; bei seiner Culmination ist 0 Uhr Sternzeit; derselbe Punkt bildet aber auch den Anfangspunkt der Rectascension, welche auf dem Aeq., also in der Richtung der täglichen Bewegung der Gestirne gezählt wird; folglich hat ein St., der 15° Rectascension hat, also 1/24 der ganzen Drehung östlich vom Frühlingsp. liegt, seine Culmination 1 Std. später, um 1 Uhr Sternzeit; überhaupt gibt die A. R. in Graden ausgedrückt bei der Division durch 15 die Std. an, in welcher der St. culminirt; ja in den astronomischen Jahrbüchern oder Ephemeriden steht die A. R. gewöhnlich in Std. ausgedrückt. Hat man eine solche Tabelle für einen St., und beobachtet man mittels des Mittagsrohres oder Passageinstrumentes den Augenblick seiner Culmination, so ist die Zeit dieses Augenblickes durch die A. R. gegeben. Um diese in Sternzeit erhaltene Angabe in mittlere Sonnenzeit zu verwandeln, muß man die A. R. der S., die ebenfalls in den Ephemeriden steht, subtrahiren, mit (365/366) multipliciren und die Zeitgleichung addiren. Für solche Correcturen der Uhren gibt es übrigens noch manche Methoden, so Dents Dipleidoskop, Steinheils Passagenprisma, den Spiegelsextant, mittels dessen man die Höhe der S. jeden Augenblick messen und dann aus Tabellen die entsprechende Zeit entnehmen kann. Diese Tabellen gelten aber immer nur für bestimmte Zeiten und Breiten, also sind alle angeführten Methoden für den Laien unbrauchbar. Das einfachste und für Jedermann handliche Instrument, das die Bestimmung der Zeit auf 1/2 Min. genau möglich macht, ist Ebles Horoskop, Fig. 379. Dasselbe enthält zunächst die T-Schiene AB um g drehbar, auf welcher sich oben die aus krummen Linien gebildete Stundenskala befindet; über derselben die Skala der Polabstände der S., links und rechts von der Stundenskala die Polhöhenskala. In dieser sucht man die Polhöhe oder geogr. Br. des betreffenden Ortes auf und verbindet die 2 Punkte links und rechts, wie es z. B. auf dem Apparat für 50° (Mainz) geschehen ist, durch eine Gerade. Nun stellt man das Horoskop auf, dreht die T-Schiene, bis der Punkt, wo der Polabstand der S. des betreffenden Tages steht, senkrecht über dem Drehp. (unsichtbar) am unteren Ende des Schenkels B sich befindet. Alsdann dreht man die L-Schiene CD um ihre Zapfen, so daß die S. durch die 2 Oeffnungen des Scheibchens k Strahlen auf das Scheibchen *l* sendet, und daß zu beiden Seiten des Striches auf derselben kleine Sonnenbildchen stehen; dann zeigt die Stellung des Lothfadens m auf der Stundenskala die wahre Zeit an. Allerdings braucht man hierzu eine Polabstandstabelle; allein solche findet man leicht z. B. in Littrows astronom. Kalend. für jedes J.

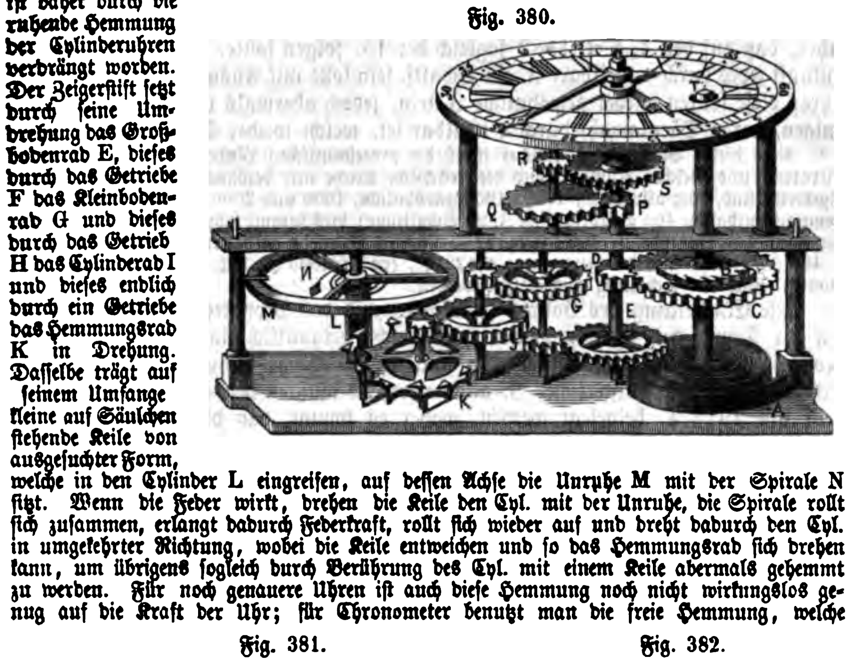
Fig. 379.



582 **Uhren und Chronometer.** Fig. 380 stellt das Werk einer Cylinderuhr vor, zu größerer Deutlichkeit etwas aus einander gerückt. A ist die Triebfeder, welche durch Umdrehen des Federstiftes T zugewunden wird, wobei das auf demselben Stifte sitzende Sperrrad B sich mit dreht und unter dem federnden Sperrhaken O hergleitet, wodurch das bekannte Schnarren beim Aufziehen entsteht. Der Sperrhaken sitzt nämlich fest auf dem Stirnrade C, das auf dem Federstifte nicht befestigt ist, aber durch das Eingreifen des Sperrhakens mitgenommen wird, wenn die gewundene Feder sich wieder aufzurollen strebt und dadurch den Federstift in entgegengesetzter Richtung dreht. Das Stirnrad greift in das Getriebe D und dreht dadurch den Zeigerstift, der an seinem Ende den Minutenzeiger trägt und unter demselben das Getriebe P; dieses greift in ein Rad mit 3mal so viel Zähnen und das mit diesem verbundene Getriebe R in ein Rad S mit 4mal so viel Zähnen, wodurch sich das Rad S 12mal langsamer dreht als der Zeigerstift; um dieses möglich zu machen, sitzt das Rad S auf einer hohlen Hülse, die den Zeigerstift bis unter den Minutenzeiger umgibt und den Stundenzeiger trägt. Die Federkraft muß so gehemmt und regulirt werden, daß der *Zeigerstift* sich in 1 Std. nur 1mal dreht. Dazu dient die Hemmung und der Regulator;

früher hatte man die Spindelhemmung, in welcher zwei Flügel einer Spindel durch die Unruhe hin- und hergeschleudert wurden und gegen ein Rad des Werkes schlugen und so dieses für einen Augenblick zurücktrieben. Diese Hemmung der alten Spindeluhren machte dieselben ungenau und erforderte noch eine Regulirung der Federkraft durch Schnecke und Kette; sie ist daher durch die ruhende Hemmung der Cylinderuhren verdrängt worden. Der Zeigerstift setzt durch seine Umdrehung das Großbodenrad E, dieses durch das Getriebe F das Kleinbodenrad G und dieses durch das Getrieb H das Cylinderrad I und dieses endlich durch ein Getriebe das Hemmungsrad K in Drehung. Dasselbe trägt auf seinem Umfange kleine auf Säulchen stehende Keile von ausgesuchter Form,

Fig. 380.



welche in den Cylinder L eingreifen, auf dessen Achse die Unruhe M mit der Spirale N sitzt. Wenn die Feder wirkt, drehen die Keile den Cyl. mit der Unruhe, die Spirale rollt sich zusammen, erlangt dadurch Federkraft, rollt sich wieder auf und dreht dadurch den Cyl. in umgekehrter Richtung, wobei die Keile entweichen und so das Hemmungsrad sich drehen kann, um übrigens sogleich durch Berührung des Cyl. mit einem Keile abermals gehemmt zu werden. Für noch genauere Uhren ist auch diese Hemmung noch nicht wirkungslos genug auf die Kraft der Uhr; für Chronometer benutzt man die freie Hemmung, welche

Fig. 381.

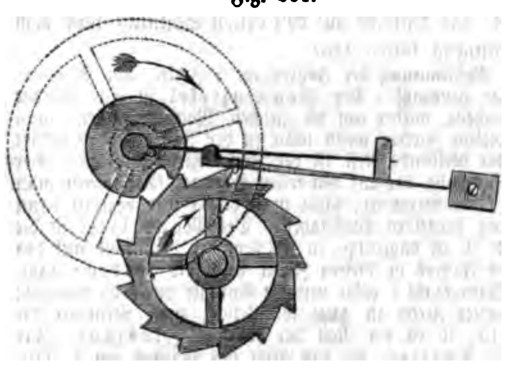
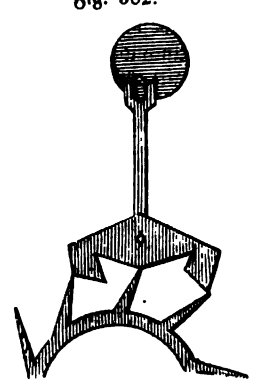


Fig. 382.



entweder Federhemmung wie in Fig. 381 oder Ankerhemmung wie in Fig. 382 ist. Solche Uhren, die zu astr. Zwecken, zur Längen- und Ortsbestimmung auf Schiffen dienen sollen, müssen auch noch Compensationen besitzen, sowie eine Einrichtung, daß während des Aufziehens die Uhr nicht still steht, z. B. zwei Gehäuse.

583 Der **Kalender** enthält die Eintheilung der Zeit; die Grundlage dieser Eintheilung ist das tropische Jahr = 365,24 222 mittleren Sonnentagen; der Julianische Kalender (Cäsar 44 v. Chr.) suchte dieser Länge gerecht zu werden, indem nach demselben alle 4 J. ein Schaltj. von 366 T. auf 3 gewöhnliche J. von 365 T. folgte. Nach dieser Vorschrift wurden in 100 J. zu 100 . 365 T. noch 25 T. zugefügt, während 100 J. doch nur 100 . 365 + 24,222 T. enthalten;

demnach waren 100 J. um 1 T. zu lang, weßhalb das Concil von Nicäa (325) 3 T. auszulassen anordnete. In dem folgenden Jahrtausend fuhr man nach dem Julianischen Kalender fort, wodurch im 16. Jahrh. der kürzeste T. auf den 11. Dec. vorgerückt war, und wodurch bei gleichem Verfahren in weiteren 10 000 J. der Frühlingsanfang auf Weihnachten gefallen wäre; Papst Gregor XIII. verordnete daher, daß auf den 4. Oct. 1582 sogleich der 15. folgen sollte, daß weiter für die Zukunft jedes durch 4 theilbare J. ein Schaltj. sein solle mit Ausnahme der Säcularjahre; diese sollten wieder gewöhnliche J. sein, jedoch abermals mit Ausnahme derjenigen, deren Säcularzahl durch 4 theilbar sei, welche wieder Schaltj. sein sollten.

Nach dieser Verordnung, welcher indeß die protestantischen Länder erst nach und nach beitraten, und welcher Rußland und die griechische Kirche nur bezüglich des zweiten Theils beigetreten sind, sind also 1700, 1800, 1900 gewöhnliche, 1600 und 2000 dagegen Schaltjahre. Demnach enthalten 400 gregorianische J. 97 Schalttage; dies stimmt sehr nahe mit der Wahrheit, weil 400 tropische J. 400 . 0,24222 = 96,888 T. mehr enthalten als 400 . 365 T.; in 400 J. beträgt also der Fehler nur 0,122 T., erst in 4000 J. 1 T.; demnach muß nach 4000 J. noch ein Schalttag ausgelassen werden.

Die Eintheilung des Jahres in Monate und des Monates in Wochen rührt von der Dauer der 4 Mondphasen her, welche bekanntlich nach dem synodischen Monat = 29 ½ T. wiederkehren; da nun 12 synodische Mon. = 354 T. (das türkische Jahr) kein bürgerliches J. ausmachen, so mußten den einzelnen Monaten mehr als 29 ½ T. beigelegt werden, woher es kommt, daß die Mondphasen in den Monaten allmälig zurück rücken.

Das Jahr der Griechen war wie das der Türken und Juden ein reines Mondenjahr, das zuerst 430 v. Chr. durch Einführung des Meton'schen Cyclus dem Sonnenjahre entsprechend umgestaltet wurde. Der Unterschied eines Mondenj. vom tropischen J. beträgt 10⁷/₈ T., was in 19 J. 206 T. ausmacht, gerade den Betrag von 7 Mondmon.; daher bestand der Meton'sche Cyclus darin, alle 19 J. 7 Mondmon. einzuschalten, so daß ein Cyclus von 19 Jahren 12 J. zu 12 und 7 J. zu 13 M. enthielt, was noch den Vorzug hatte, daß nach Ablauf des Cyclus die Mondphasen und Finsternisse wieder in denselben Zeiten erschienen, da in dieser Zeit die Mondknoten ihren chaldäischen Umlauf vollzogen haben.

Für die Bestimmung des Osterfestes und darnach aller beweglichen Feste wurde ebenfalls schon in Nicäa festgesetzt, daß dasselbe auf den ersten Sonntag nach dem ersten Vollmonde nach Frühlingsanfang fallen solle.

Der alte Kalender hatte für die Bestimmung der Jahrestage 3 Zirkel, den Sonnenzirkel, den Mondzirkel und der Römer Zinszahl. Der Sonnenzirkel ist eine Periode von 28 J., nach deren Ablauf die Wochent. wieder auf die gleichen Monatst. fallen; man erhält die Nummer eines Jahres in diesem Zirkel, wenn man zu der Jahreszahl 9 addirt und die Summe durch 28 dividirt; der bleibende Rest ist der Zirkel für das Jahr. Der Sonntagsbuchstabe ist derjenige Buchstabe, der auf den ersten Sonntag fällt, wenn man den 1. Jan. mit A, den 2. mit B u. s. w. bezeichnet; zählt man bis G und beginnt dann wieder mit A, so erhält jeder Sonntag denselben Buchstaben. Der Mondzirkel ist die bekannte Periode von 19 J.; das erste J. ist dasjenige, in welchem der Neumond auf den 1. Jan. fällt, und die Nummer eines Jahres in diesem Zirkel heißt die güldene Zahl. Man erhält dieselbe, indem man zur Jahreszahl 1 zählt und die Summe durch 19 dividirt; der Rest ist die güldene Zahl. Der dritte Zirkel ist ganz willkürlich; man vermehrt die Jahreszahl um 3 und dividirt mit 15, so ist der Rest der Römer Zinszahl. Zur Bestimmung der Ostern dienen noch die Epakten, die das Alter des Mondes am 1. Jan. vom Neumonde an gerechnet bezeichnen; da nach 19 J. jede Monderscheinung wiederkehrt, so stellte man für jedes Jahrh. eine Tafel von 19 Epakten für 19 güldene Zahlen auf, zählte vom 1. Jan. mit Lunationsperioden von 29½ T. und 13 T. bis zum Vollmonde, so erhielt man den Ostervollmond und durch den Sonntagsbuchstaben den Tag des Osterfestes.

584 Aufg. 837. Ein 120^{dm} hoher Gnomon warf zur Zeit des Sommersolstitium einen $22{,}5^{dm}$ langen Schatten, zur Zeit des Wintersolstitium einen solchen von $189{,}234^{dm}$, wie hoch stand in beiden Fällen die S., und wie groß ist die Schiefe der Ekliptik? Aufl.: $\tang \alpha = 120 / 22{,}5$; $\tang \beta = 120 / 189{,}234$; $\varepsilon = 23^\circ 30'$. — A. 838. Die Schiefe der Ekliptik ε und die Länge l der Sonne sind gegeben; die A. R. und D. zu finden. Aufl.: $\tang a = \tang l \cos \varepsilon$, $\sin \delta = \sin l \sin \varepsilon$. — A. 839. Aus der geogr. Br. α und der D. der S. die Zeit und den Ort des Sonnenaufgangs zu finden. Aufl.: Für das Azimuth des Aufganges a ist $\cos a = (90 \mp \delta) \cos \alpha$, für den Stundenwinkel, d. i. den Winkel, den

der Declinationskreis mit dem Meridian macht, ist $\cos s = \tang \alpha / \tang (90 \mp \delta)$; der Stundenwinkel dividirt durch 15 gibt die Zahl des Aufganges nach Mitternacht. — A. 840. Die Höhe und das Azimuth der S. für einen Tag zu finden, an dem die D. der Sonne δ, und für einen Ort, dessen geogr. Br. $= \alpha$ ist. Aufl.: $\sin h = \sin \alpha \sin \delta$; $\cotg a = \cotg \delta / \cos \alpha$. — A. 841. Um welche Zeit steht an einem gegebenen Orte die Sonne gerade im Westen oder Osten? Aufl.: $\cos s = \tang \delta / \tang \alpha$; die Zeit ist $s / 15$. — A. 842. Aus der Höhe und Decl. der S. für einen gegebenen Ort die Zeit zu berechnen. Aufl.: Setzt man $90 - h + \alpha - \delta = 2x$ und $90 - h - (\alpha - \delta) = 2y$, so ist $\sin \frac{1}{2} s = \sqrt{(\sin x \sin y / \cos \delta \cos \alpha)}$; die Zeit ist $s / 15$. — A. 843. Für einen gegebenen Zeitpunkt die Höhe der Sonne zu berechnen; die Zeit mal $15 = s$. Aufl.: $\cos (90 - h) = \cos (90 - \delta) \cos (90 - \alpha) + \sin (90 - \delta) \sin (90 - \alpha) \cos (180 - s)$ oder $\sin h = \sin \delta \sin \alpha - \cos \delta \cos \alpha \cos s$. — A. 844. Die Tagesdauer zu bestimmen für einen gegebenen Ort zu einer Zeit, wo die A. R. und D. der S. gegeben sind. Aufl.: $\cos \frac{1}{2} t = - \tang \delta \operatorname{tg} \alpha$. — A. 845. Die Tagesdauer mit Berücksichtigung der Strahlenbrechung β und des Sonnenradius ϱ zu bestimmen? Aufl.: Setzt man $\frac{1}{2} (90 + \beta + \varrho + \delta - \alpha) = a$ und $\frac{1}{2} (90 + \beta + \varrho - \delta + \varphi) = b$, so ergibt sich $\sin \frac{1}{4} t = \sqrt{[\sin a \sin b / \cos \delta \cos \alpha]}$. — A. 846. Die Länge des kürzesten und des längsten T. zu finden. Aufl.: $\cos \frac{1}{2} t = - \tang \varepsilon \tang \alpha$. — A. 847. Hierbei die Nebendata in 845. zu berücksichtigen. Aufl.: Ist $\frac{1}{2} (90 + \beta + \varrho + \alpha - \varepsilon) = a$ und $\frac{1}{2} (90 + \beta + \varrho - \alpha + \varepsilon) = b$, so ist $\sin \frac{1}{4} t = \sqrt{[\sin a \sin b / \cos \varepsilon \cos \alpha]}$. — A. 848. Die Parallaxe der S. ist 8,88″; der Radius der Erde 859 M.; wie groß ist die Entf. der S.? Aufl.: $859 / \sin 8{,}88'' = 20\,000\,000$ M. — A. 849. Der mittlere scheinbare Winkeldm. der S. ist 32′ 0, 9″; wie groß ist der Dm. und der Inhalt? Aufl.: $2 \cdot 20\,000\,000 \tang 16' 0{,}45'' = 190\,000$ M.; Vol. $= 1\,300\,000$ Erdinhalten.

Elfte Abtheilung.

Die Physik der Erde.

585 **Ortsbestimmung.** Die Gestalt, Größe, Masse, Dichte und Bewegung der Erde wurden in der Physik des Himmels betrachtet; der Geschichte der Erde, der Entstehung und Umbildung der Erdschichten und Gebirgmassen ist eine eigene Wissenschaft, die Geologie, gewidmet. Die Vertheilung von Land und Meer, die Gliederung der Erdoberfläche fällt der physikalischen Geographie anheim; das Ausmessen der Größe der einzelnen Theile, wie auch der ganzen Erdoberfläche gehört einer eigenen Wissenschaft, der Geodäsie. Uns erübrigt hier die Betrachtung solcher Erscheinungen, denen physikalische Ursachen zu Grunde liegen. Ein wesentliches Grundelement solcher Erscheinungen ist der Ort derselben; ein Ort auf der Erde wird bestimmt durch die geographische Breite und die geographische Länge, zu deren Grundlage sich von selbst der Aeq. bietet. Die geogr. Br. ist der Bogenabstand eines Punktes von dem Aeq., auf dem Meridian des Punktes gemessen; die geogr. L. ist der Bogenabstand des Meridians eines Punktes von dem ersten Meridian der Erde auf irgend einem Parallelkreise gemessen. Leider sind verschiedene erste Meridiane aufgestellt worden, der von Ferro, der von Paris und der von Greenwich. Die Bestimmung der geogr. Br. beruht auf dem Satze: die Polhöhe (550.) ist gleich der geogr. Br.; die Bestimmung der geogr. L. darauf, daß jedes Gestirn in 24 St. einen Himmelsparallel von Osten nach Westen, also in 4 Min. 1° durchläuft, daß es in 4 Min. aus dem Zenit oder dem Meridian eines Ortes zu dem eines um 4° nach Westen zu gelegenen Ortes geht, daß demnach ein Ort um soviel Viertelgrade von einem anderen nach Westen zu entfernt ist, als ein und dasselbe Gestirn Min. später culminirt. Da auch die S. für jeden 15° weiter westlich gelegenen Ort 1 St. später culminirt, so differirt die Zeit zweier Orte für je 15° um 1 St.; umgekehrt sind zwei Orte um 15° von einander entfernt, wenn ihre Zeit um 1 St. differirt. Hat man daher ein Mittel, den Zeitunterschied zweier Orte für denselben Moment festzustellen so hat man auch ihren Längenunterschied, den man häufig sogar in St. und Min. angibt.

Die Messung der geogr. Br. besteht also darin, den Abstand des Himmelsnordpoles vom Nordpunkte, seinen kleinsten Abstand vom Hor., d. i. von derjenigen Stelle derselben zu finden, wo irgend ein St. in seiner täglichen Bewegung den Hor. tangirt; für eine angenäherte Bestimmung genügt schon die Messung der Höhe des Polarst. mittels eines Quadranten oder Sextanten. Genauer geschieht es, indem man mit dem im Meridian aufgestellten Mittagsrohre die kleinste und die größte Höhe des Polarst. oder irgend eines anderen Circumpolarst., also die Höhen mißt, in welchen der St. durch den Meridian geht, und das arithmetische Mittel derselben nimmt. Hat man Declinationstafeln der S. zur Hand, so findet man die g. Br. auch, indem man die Höhe der S. mißt, von dieser die Decl. abzählt und den Rest von 90° subtrahirt; denn die Höhe der S. setzt sich zusammen aus der Höhe des Aeq. und dem Abstande der S. vom Aeq., also aus der Decl.; demnach ist die Aequatorhöhe gleich der Sonnenhöhe weniger deren Decl.; die Polhöhe ist aber das Complement der Aequatorhöhe. Hat man Declinationstafeln der St. zur Hand, so können diese zu einer sehr genauen Breitenbestimmung dienen. Man beobachtet nur die Zeit, in welcher ein Nichtcircumpolarst. den ersten Verticalkreis östl. und westl. vom Zenit schneidet, d. i. den Verticalkreis, der durch den Ost- und Westpunkt geht. Aus diesen 2 Zeitpunkten findet man leicht den kleinsten Abstand des St. vom Zenit und dann durch Addition von 90° seine Höhe; zählt man hiervon seine Decl. ab, so hat man wieder die Aequatorhöhe.

Die einfachste Längenbestimmung geschieht mittels genauer Chronometer, deren Wichtigkeit z. B. für die Schifffahrt hierdurch erklärlich ist. Man geht z. B. von dem ersten Meridian mit einem auf dessen Zeit gestellten Chronometer nach Westen zu und vergleicht überall die Zeit des Chronometers mit der Zeit der berührten Orte; die Länge jedes Ortes beträgt so viele Viertelgrade, als der Zeitunterschied Min. beträgt. Umgekehrt geht das Chronometer für jeden Ort so viel mal 4 Min. vor, als der Ort Grade weiter westlich liegt. Kommt man z. B. mit einem Londoner Chronometer in New-York an, wenn das Chronometer Mittag zeigt, so ist es in New-York erst 7 Uhr Morgens; langt man an einem folgenden Mittage seines Chronometers in San Franzisko an, so ist dort erst 4 Uhr Morgens. Würde man seine Uhr, wie es die ersten Weltumsegler thaten, immer nach der Zeit des Ortes stellen, so würde man bei weiterem Reisen nach Westen immer weiter in der Zeit zurückkommen und bei einem ganzen Umkreise um einen ganzen Tag zurück sein, so daß beim Wiederankommen in der Heimat dieselbe um 1 T. im Datum voran wäre, und man so scheinbar 1 T. verloren hätte; aber nur scheinbar, weil jeder der zurückgelegten Reisetage länger war als ein wirklicher T. und zwar immer soviel mal 4 Min., als man Grade nach Westen zurückgelegt hat, weil also alle zusammen um 1 T. länger waren; man hat dieselbe Zeit erlebt, nur einen Sonnenuntergang weniger. Umgekehrt wenn man von Osten der Sonne entgegen reist, wird jeder T. um so viel mal 4 Min. kürzer, als man Grade zurücklegt; man erlebt dann bei der völligen Reise um die Welt einen Sonnenuntergang mehr, gewinnt scheinbar einen T. Osteuropa, Asien sind uns in der Zeit voran, der atlantische Ocean und Amerika zurück; auf dem großen Ocean ist daher die Grenze, wo man einen Tag zurück datiren muß, wenn man nach Osten über die Linie reist, und um einen Tag voran, wenn man nach Westen die Linie passirt. Die Linie des Datumwechsels ist nicht nach einem wissenschaftlichen Princip gezogen, sondern hat sich nach dem Zufall gebildet, ob ein Ort seinen Kalender von östlichen oder westlichen Seefahrern erhielt; so ist Neuseeland der östlichste Punkt, der noch die Zeit des großen Continentes hat, der also alle unsere Kalendertage z. B. den Neujahrstag zuerst beginnt.

Die hierauf beruhende Längenbestimmung ist auf Schiffen üblich; hat man ein nach Greenwicher Zeit gestelltes Chronometer und bestimmt an einem Orte von unbekannter Lage die Zeit, so beträgt die Länge soviel Viertelgrade, als der Zeitunterschied Min. enthält. Sind die Zeitbestimmung und das Chronometer auf 1 Sec. genau, so bestimmt man den Ort auf den 240. Theil eines Grades, am Aeq. auf 450m, in mittleren Breiten auf 300m genau. Da das Chronometer hier nur den Zweck hat, anzugeben, welche Zeit am Anfangspunkte im Augenblicke der Zeitbestimmung stattfindet, so kann auch das Chronometer entbehrt werden, wenn man ein Mittel hat, eine und dieselbe Erscheinung an 2 Orten zu beobachten; der Zeitunterschied beider Orte mit 15 multiplicirt, gibt den Längenunterschied in Graden, oder auch der Zeitunterschied ist der Längenunterschied in Std. Als solche Erscheinungen können gelten: Blickfeuer d. h. Feuersignale, welche an beiden Orten gesehen werden; die Verfinsterung der Jupitermonde, deren Zeit für den Anfangsp. man in Tab. bei sich führt, und deren Zeit für den fraglichen Ort man dann bestimmt; eine Mondfinsterniß, wo man die Zeitmitte zwischen dem vollendeten Eintritte und Austritte ins Auge faßt; die Stellung oder scheinbare Entf. des Mondes von gewissen Fixst., deren Entf. vom Monde, wie sie im Anfangsp. erscheint, man in Tab., z. B. Nautical Almanac bei sich führt. Die vollkommenste Längenbestimmung bis auf 1/50 Sec. genau ist erst durch die el. Telegraphie möglich geworden. Würde ein telegraphisches Zeichen keine Zeit erfordern, so hätte man von dem fraglichen Orte nur die Ortszeit nach dem Anfangsp. oder umgekehrt

zu telegraphiren, um in dem Zeitunterschiede auch den Längenunterschied zu erhalten. Da aber sowohl der galv. Strom, als auch der Eletroms. und die Bewegung des Ankers Zeit gebrauchen, deren Dauer man noch nicht kennt, so telegraphirt der erste Ort seine Zeit nach dem zweiten, der zweite nach dem ersten; jeder Ort bildet seinen Unterschied, und das Mittel beider ist die richtige Zeitdifferenz. Will man noch genauer verfahren, so vertauscht man beide App., um Fehler, die aus kleinen Verschiedenheiten derselben herrühren, auszugleichen, ja sogar auch die beiden Telegraphisten, um die „persönliche Gleichung" derselben, die Verschiedenheit des Hörens, Auffassens, Niederdrückens der Tasten u. s. w. zu compensiren.

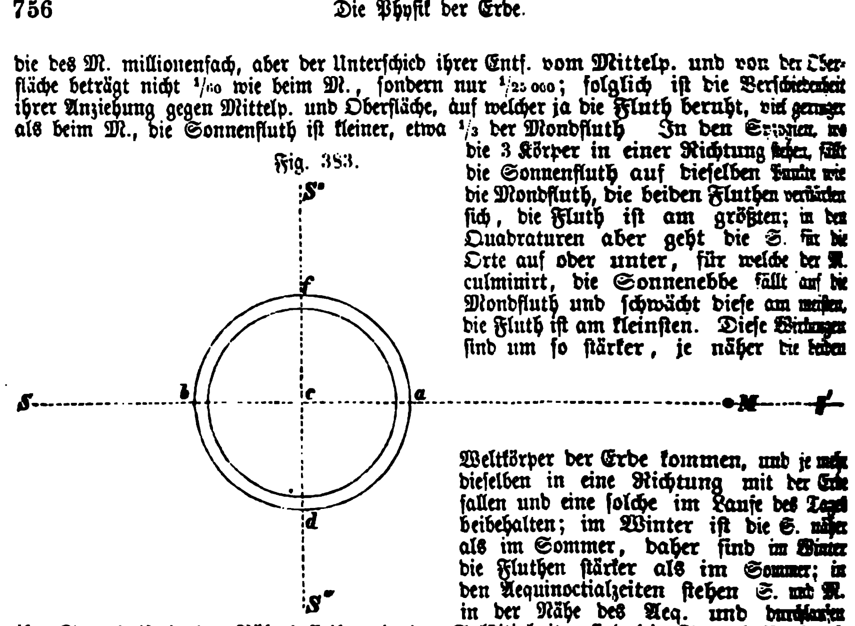
1. Bewegungen des Wassers.

Ebbe und Fluth (Newton 1687, Laplace 1790). Unter Ebbe und Fluth **586** versteht man das täglich zweimal erfolgende Fallen und Steigen des Meeres; dasselbe ist nicht merklich in Binnenmeeren und in solchen Meerestheilen, die durch enge und weitläufige Meeresarme mit den Weltmeeren in Verbindung stehen, wie in der Ostsee, sowie auch nicht auf hohem Weltmeere fern vom Lande. An den Küsten der Weltmeere beträgt die Fluthhöhe durchschnittlich 1^m, etwas höher ist die Fluth an Ost- als an Westküsten, noch höher in engen Armen der Weltmeere, wie im Canal bis 6^m, am höchsten am hinteren Ende geschlossener Buchten solcher Arme wie bei St. Malo 16^m; die Fluth verflacht sich sehr, wenn sie durch schmale Meeresengen in weite Seitenbecken tritt, erhebt sich aber wieder in engen Hinterbuchten; so ist sie an den Vorderküsten des Mittelmeeres kaum $^1/_3{}^m$, bei Venedig $1{,}3^m$. Ebbe und Fluth hängen mit dem Monde zusammen; dies zeigen folgende Erscheinungen: 1. die Fluthwelle geht wie der Mond jeden Tag von Osten nach Westen um die Erde, so daß sie auf offenem Meere sich durch eine westliche Strömung anzeigt, und daß die Verbindungslinien gleichzeitiger Fluthorte (Whewells Isorachien) für große Meere eine meridianale Richtung haben. 2. Die Fluth tritt durchschnittlich jeden Tag 50 Minuten später ein. 3. Die Fluth findet statt zur Zeit der oberen oder unteren Culmination des Mondes, die Ebbe zur Zeit des Auf- oder Unterganges desselben. 4. Die Hochfluthen oder Springfluthen treten zur Zeit der Syzygien, bei Neu- und Vollmond ein, die niedrigsten oder Nippfluthen zur Zeit der Quadraturen, beim ersten und letzten Viertel; hieraus folgt, daß auch die Sonne mitwirkt. 5. Die höchsten Fluthen finden statt, wenn die Syzygien zusammenfallen mit Perigäum und Perihelium und mit einer Finsterniß. 6. Die Fluth ist höher zur Zeit der Aequinoctien als in anderen Zeiten, höher im Winter als im Sommer. 7. Die Fluth nimmt mit der Entfernung vom Aequator ab und verschwindet in 65^0 Br. ganz.

Ebbe und Fluth sind eine Wirkung der verschiedenen Anziehung des Mondes gegen die Oberfläche und den Mittelpunkt der Erde. Der M. M ist nämlich dem nächsten Punkte a (Fig. 383) der Erdoberfläche, d. i. dem, für welchen er oben culminirt, um $^1/_{60}$ näher als dem Mittelp. c, und von dem entferntesten Punkte b der Erde, d. i. für welchen er unten culminirt, um $^1/_{60}$ weiter entfernt, als von dem Mittelp. c; folglich wird der nächste Punkt a stärker angezogen als der Mittelp. c, muß mehr nach dem M. zu fallen als dieser, und muß sich daher, wenn dies möglich ist, vom Mittelp. entfernen; möglich ist es, wenn sich an diesem Punkte Meer befindet, weil das Wasser beweglich ist; es muß sich dann das Wasser vom Mittelp. entfernen, d. h. es muß sich heben. Ganz dasselbe geschieht auch am entferntesten Punkte b; denn dieser wird schwächer angezogen als der Mittelp. c, muß daher weniger nach dem M. zu fallen als dieser, muß sich daher ebenfalls, wenn möglich, von diesem entfernen, d. h. dort befindliches Wasser muß sich heben. Es findet daher ein Steigen des Wassers, Fluth, statt für die 2 Punkte a und b, für welche der M. den höchsten und den tiefsten Stand einnimmt; zwischen diesen Stellen in der Mitte befinden sich die 2 Meridiane, für welche der M. auf- oder untergeht; von diesen Stellen f und d muß Wasser nach den Fluthstellen hinsinken, um dort den durch das Steigen entstehenden leeren Raum auszufüllen, das Wasser muß also an diesen Zwischenstellen fallen, hier ist Ebbe. Eine solche Stelle f geht in 24 St. um die ganze Erde, also in 6 St. bis an die Fluthstelle a, in 12 St. bis an die folgende Ebbenstelle d, also wechseln Ebbe und Fluth alle 6 St. ab. Da aber der M. jeden T. 50 Min. später culminirt, so muß auch die Fluth für einen und denselben Ort jeden T. 50 Min. später eintreffen. Die Masse der Sonne übertrifft zwar

die des M. millionenfach, aber der Unterschied ihrer Entf. vom Mittelp. und von der Oberfläche beträgt nicht $^1/_{60}$ wie beim M., sondern nur $^1/_{23000}$; folglich ist die Verschiedenheit ihrer Anziehung gegen Mittelp. und Oberfläche, auf welcher ja die Fluth beruht, viel geringer als beim M., die Sonnenfluth ist kleiner, etwa $^1/_3$ der Mondfluth. In den Syzygien, wo die 3 Körper in einer Richtung stehen, fällt die Sonnenfluth auf dieselben Punkte wie die Mondfluth, die beiden Fluthen verstärken sich, die Fluth ist am größten; in den Quadraturen aber geht die S. für die Orte auf oder unter, für welche der M. culminirt, die Sonnenebbe fällt auf die Mondfluth und schwächt diese am meisten, die Fluth ist am kleinsten. Diese Wirkungen sind um so stärker, je näher die beiden

Fig. 383.



Weltkörper der Erde kommen, und je mehr dieselben in eine Richtung mit der Erde fallen und eine solche im Laufe des Tages beibehalten; im Winter ist die S. näher als im Sommer, daher sind im Winter die Fluthen stärker als im Sommer; in den Aequinoctialzeiten stehen S. und M. in der Nähe des Aeq. und durchlaufen ihre Tageskreise in der Nähe desselben, in den Solstitialzeiten sind die Tageskreise aber oft weit aus einander. Am genauesten in einer Linie stehen die 3 Körper zu Finsternißzeiten, bewirken also starke Fluthen. Die Wirkung auf den Aeq. hat eine am meisten senkrechte Richtung; für andere Orte ist die Richtung um so schiefer, je größer ihre Breite ist, wodurch Ebbe und Fluth mit der Breite abnehmen. Da das Wasser den Anziehungen nur allmälig folgen kann, so treffen alle geschilderten Wirkungen nicht auf den Zeitpunkt derselben, sondern etwas später ein.

Aus der Ebbe und Fluth haben Kant (1754) und Mayer (1848) eine **Zunahme der Tageslänge** geschlossen, während man längere Zeit eine Abnahme derselben vermuthete. Dies letztere glaubte man aus der allmäligen Abnahme der Erdwärme folgern zu dürfen, welche in dem nahezu absolut kalten Weltraume unvermeidlich sei; diese Abnahme aber sollte eine Zusammenziehung der Erde zur Folge haben und so wegen der Unveränderlichkeit der Geschw. nach dem Gesetze der Trägheit eine Verkürzung der Rotationszeit nach sich ziehen. Nun hatten aber schon die alten Griechen die Umlaufszeiten der Pl. in Tagen angegeben; wären die T. kürzer geworden, so müßten diese Umlaufszeiten in T. ausgedrückt, größer erscheinen, was nicht der Fall ist. Außerdem ist die Umlaufzeit des Mondes schon 200 v. Chr. gemessen worden und kann für alle Folgezeiten aus den Finsternissen geschlossen werden, woraus sich bekanntlich die Acceleration des M. ergibt, die man aus den 24000jährigen Schwankungen der Exc. der Erdbahn erklärt. Hiernach müßte die Acc. immer dieselbe sein; wenn aber die Tageslänge sich verkürzt hätte, so müßte die Acc. in einem jetzigen Jahrh. größer sein, und zwar müßte die Länge des M. 3 Bogenmin. mehr betragen, wenn sich die Tageslänge nur um 0,01 Sec. verkürzt hätte. Da nun dies nicht der Fall ist, so hat die Tageslänge in historischer Zeit sich nicht verkürzt, die Erde hat sich nicht zusammengezogen, ihre Wärme ist constant geblieben; was sie durch Ausstrahlung verloren hat, hat sie durch die Sonnenwärme wieder gewonnen; hierauf deuten auch verschiedene meteorologische Angaben aus alter Zeit (Palästina zu Moses Zeit). Nun haben aber neue Berechnungen des M. von Delaunay und von Adams gezeigt, daß die Acc. aus der Exc. berechnet um 6 Sec. kleiner ist als die Beobachtungen ergeben, daß also die Tageslänge zugenommen haben muß und zwar um 0,01197 Sec. in 2000 Jahren. Kant hatte dies schon daraus geschlossen, daß die Fluthwelle hinter dem Meridian des Mondes immer etwas zurückbleibt, also östlich von demselben steht, daß also der Mond auf diesen Wasserberg eine Anziehung nach Westen zu, entgegengesetzt der Rotationsrichtung ausübt, wodurch die Rotationszeit verlängert wird.

Auch die bis heute unerklärt gebliebenen geologischen Thatsachen des öfteren **Versenkens ganzer Continente** in das Meer und der **Eiszeiten** sind in der letzten Zeit durch die Ebbe und Fluth erklärt worden (Schmick 1869). Bekanntlich bestehen die *meisten* Theile der Erdrinde bis in unmeßbare Tiefen hinab aus Schichten, welche durch

die Versteinerungen von Meeresthieren und Pflanzen ihre Absetzung aus Meeren beurkunden, also eine Versenkung der Continente unter das Meer unwidersprechlich machen, die man nur nothdürftigerweise durch benachbarte Hebungen, durch Auswaschungen u. s. w. erklärte. Schmicks Theorie benutzt die bekannte Wanderung des Perihels der Erde, das jetzt am 2. Jan. stattfindet und in 21 000 J. die Ekliptik durchläuft, so daß es jetzt in den Sommer des Südens fällt und diesen dadurch um 8 T. verkürzt. Die S. wirkt daher im Sommer des Südens auf die südlichen Meere längere Zeit senkrecht und aus größerer Nähe, die Sommersonnenfluthen des Südens sind stärker als die des Nordens, es gelangt daher im Sommer des Südens dorthin eine große Wassermenge, welche in unserem Sommer nicht vollständig wieder zurückkehrt, weil dann das Aphel stattfindet, und welche auch durch die Winterfluthen nicht vollständig compensirt wird. Hierdurch gelangt 5000 J. lang jedes J. etwas Wasser nach dem Süden und bewirkt dort ein allmäliges Steigen der Meere, was nicht blos durch die Beobachtung bestätigt wird, sondern auch die geringe Landmenge des Südens erklärt. In den folgenden 5000 J. fällt das Perihel mehr in die Aequinoctien, in dem nachfolgenden gleichen Zeitraume in unseren nördlichen Sommer; folglich wird in diesem sich in gleicher Weise die Meeresmenge des Nordens vergrößern, die nördlichen Continente großentheils überfluthen, während die des Südens neu aus den Meeren hervorgehen; demnach wiederholen sich die Versenkungen in Perioden von 21 000 Jahren. Diejenige Halbkugel nun, welche vorwiegend Wasser enthält, muß schon durch die große Wärmecapacität des Wassers eine geringere Temp. erhalten, sie muß außerdem durch die massenhaftere Verdunstung und Eisschmelzung eine größere Wärmemenge verzehren; hierdurch erklärt sich schon die größere Kühle der Südhälfte, das Ueberwuchern des Eises am Südpole, die südliche Eiszeit. Schmick führt aber auch noch an, daß die kürzere Dauer des südlichen Sommers nicht durch die größere Sonnennähe compensirt werde, indem die Wirkung der letzteren durch die größere Sonnenferne in dem längeren Winter aufgehoben wird, daß also der kürzere Sommer und längere Winter der Südhälfte durch Jahrtausende hindurch derselben allmälig eine bedeutend niedrigere Temp. verschaffen müssen; hierdurch erklärt sich dann ausreichend die Eiszeit des Südens, die Thatsache, daß dort in der Breite von Rom Gletscher bis ins Meer ragen. Da mit dem Wandern des Perihels auch der Ueberschuß des Winters über den Sommer nach Norden gelangt, so muß in 10 000 Jahren bei uns nicht blos wieder allgemeine Ueberfluthung, sondern auch Eiszeit herrschen.

Die Meeresströme bestehen aus einem Fließen des Meerwassers nach bestimmten Richtungen. Der mächtigste Meeresstrom ist die äquatoriale Strömung, welche in den tropischen Weltmeeren von Osten nach Westen in einer Br. bis zu 45°, in einer Mächtigkeit bis zu 2000^{m} und einer Geschw. von 1^{m} stattfindet. An den Ostküsten der Continente werden sie abgelenkt und biegen nach Norden und Süden, wobei sie durch die Drehung der Erde allmälig eine Richtung nach Osten erhalten; der mächtigste dieser abgelenkten Ströme ist der Golfstrom, der in einer anfänglichen Breite von 30—40 M., aber mit allmälig zunehmender Breite und abnehmender Geschw. Wasser von einer Anfangstemp. von 30° an die Westküsten von Europa bis nach Spitzbergen hinauf befördert. Zur Compensation fließen Polarströme nach dem Aeq. hin, die durch die Drehung der Erde allmälig eine Richtung nach Westen erhalten; wichtig sind der arktische Strom, der aus dem Eismeere und der Davisstraße kommend an den Küsten von Nordamerika hinabfließt, der Humboldtstrom an den Küsten von Chile und Peru und der antarktische Strom, der sich im Süden in den atlantischen Ocean ergießt. Für die Entstehung der Meeresströme führt man mehrere Ursachen an: 1. Unterschied in der Temp. des tropischen und des polaren Wassers. 2. Ebbe und Fluth. 3. Die in den Gegenden der Wendekreise vorherrschend nach Westen gerichteten Winde. 587

In den pol. Gegenden ist das Wasser ca. 30° kälter als in den trop. und ist dort viel schwerer als hier; es herrscht deßhalb in den Tiefen der Polarmeere ein Ueberdruck nach den Tropen hin, vermöge dessen das Wasser in der Tiefe von den Polarmeeren nach dem Aeq. strömt; hierdurch erklärt sich, warum über Untiefen die Temp. des Wassers so rasch nach unten abnimmt, indem der kalte Polarstrom über den Gipfel der Untiefe weggehen muß, sowie warum am Aeq. in der Tiefe das Meer oft nur eine Temp. wenig über Null zeigt; durch dieses untermeerische Vordringen des Polarwassers und durch das rasche Verdunsten an der Oberfl. muß das Wasser am Aeq. aus der Tiefe in die Höhe kommen, kann aber seine geringere Tiefen- und polare Geschw. von Westen nach Osten nicht sofort aufgeben, bleibt deßhalb gegen die oberen angrenzenden Meerestheile scheinbar nach Westen

zurück, d. h. hat eine Richtung nach Westen. Verstärkt wird diese Wirkung durch die Fluth, welche ja aus einer nach Westen fortschreitenden Welle besteht, sowie durch die Einwirkung der 2 Ostwinde, welche beiderseits an den Wendekreisen herrschen und daher das Meer ebenfalls nach Westen treiben. Daß eine solche Wirkung möglich ist, zeigt das indische Meer, wo die im Winter und Sommer in entgegengesetzter Richtung wehenden Monsune auch entgegengesetzte Meeresströme erzeugen. Solche von Winden erzeugte Ströme nennt man Trifte.

588 **Die Süßwasserströme.** Das vom Meere verdunstende Wasser wird als Wasserdampf durch Diffusion und durch Winde auch über die Continente getragen, wird durch Abkühlung condensirt und fällt so frei von Salzen als Süßwasser in Form von Regen, Schnee u. s. w. auf die Erde nieder, sammelt sich in Bächen, Flüssen und Strömen (s. 178.) und wird so in das Meer zurückgeführt. Ein Theil sickert auch in die Erde ein, sammelt sich in Adern, die zusammenfließend ein Wurzelsystem bilden und vereinigt als Quelle zu Tage treten. Kommt eine Quelle aus größerer Tiefe, so nimmt sie an der Erdwärme tieferer Schichten Theil und tritt als warme Quelle oder Therme zu Tage; eine solche ist auch immer Mineralquelle, d. h. enthält mineralische Stoffe in größerer Menge gelöst, obschon es auch kalte Mineralquellen gibt. Ist die Ader der Quelle zwischen Wasser nicht durchlassenden Schichten gespannt, so kommt sie als Springquell zu Tage, der auch künstlich mittels Durchbohren der oberen nicht durchlassenden Schicht als artesischer Brunnen emporsprudeln kann. Intermittirende Quellen sind solche, welche abwechselnd fließen und nicht fließen; sie bestehen entweder aus einer Steinhöhlung mit einem schenkelheberartigen Ausflußkanal, oder aus einer Höhlung, in welcher Gas- oder Dampfdruck wie beim Heronsball das Wasser durch einen aufsteigenden Kanal austreibt, oder wie bei den Geisern aus einem hohen, senkrechten Steinrohre, das sich von unten mit allmälig steigendem heißen Wasser ausfüllt, das dann durch von unten eindringenden Dampf unten allmälich bis zum Siedepunkte erhitzt wird, der dem großen Druck der Wassersäule nahezu entspricht, und, wenn eine von den immer aufsteigenden Dampfblasen den oberen Theil der Säule für einen Augenblick hebt, nun bei vermindertem Drucke plötzlich eine große Dampfmenge entwickelt, welche die Wassersäule hinaus schleudert.

Der Quellenbildung kommt es zu statten, wenn Adern auf eine nicht durchlassende Schicht treffen; großen Einfluß auf dieselbe hat das Material, die Lage und Neigung der Erdschichten, sowie die Witterung und die Jahreszeiten. Aus je größeren Tiefen die Quellen kommen, und je ausgedehnter ihr Wurzelsystem ist, desto unabhängiger werden sie von der Witterung; oberflächliche Quellen nehmen in trockenen Zeiten ab oder versiechen ganz. Eine Quelle ist eigentlich schon eine Therme, wenn ihre Temp. die mittlere des Ortes übersteigt; sie ist um so heißer, aus je größerer Tiefe sie kommt. Ein artesischer Brunnen entsteht z. B. wenn eine muldenförmige, wasserdurchlassende Sand- oder Kalkschicht, die mit ihren Köpfen zu Tage tritt, zwischen 2 wasserdichten Thonschichten liegt; das auf die Köpfe fallende Tagwasser sickert in der Sandschicht bis an den tiefsten Punkt, füllt allmälig die Schicht bis an die Köpfe und gibt so den tiefsten Theilen durch den hydrostatischen Druck eine starke Spannung, welche dieselben durch ein Bohrloch nahe bis zur Höhe der Köpfe treibt. Bei intermittirenden Quellen kann die Unterbrechung in Sand oder Gasblasen liegen, die den Ausgang hemmen; hat dieselbe einen schenkelheberartigen Ausflußkanal und ein Reservoir, so fließt nach der Theorie des Hebers (194.) das Wasser aus, wenn es bis an die höchste Stelle des Hebers gestiegen ist, und hört erst zu fließen auf, wenn es in der Höhle bis zur Höhe der Ausflußöffnung gesunken ist. Manche Quellen führen eine große Menge Kohlendioxyd mit sich, welches über dem Spiegel in einem Behälter sich zu großem Drucke anhäufen kann; der anfänglich klare Strahl wird nach oben perlend und immer schäumender, indem unter dem geringer werdenden Drucke sich das Gas stärker und oft so stark entwickelt, daß der Strahl noch höher geschleudert wird (Sprudel in Nauheim). Die Wirksamkeit des Strokr und des kleinen Geisers auf der Insel Island, welche in regelmäßigen Zwischenzeiten Wassergarben von 10 bis 12^m Höhe ausschleudern, erklärt sich nach Mackenzie und Bunsen durch Dämpfe, welche sich vor dem Ausbruche über dem Wasserspiegel in einem unterirdischen Kessel angesammelt haben. Viel verwickelter sind die Erscheinungen am großen Geiser, der sich vermöge seines Gehaltes an gelöster Kieselsäure allmälig sein Rohr und sein oberes Ausflußbecken selbst aufbaut und durch immer höheren Bau sich erst selbst schafft und wieder vernichtet. Wegen der Höhe des Rohres kühlt sich nach einem Ausbruche das aufsteigende Wasser unter den Siedep. ab, erhebt sich aber durch aufsteigende Dampfblasen, die sich con-

densiren, in allen Schichten bis zum Siedep., welcher dem Drucke der überliegenden Wassersäule entspricht; von da an fängt das Wasser an zu kochen, zuerst dünne, dann dickere Dampfblasen steigen auf, heben kleinere Wassersäulen zu „mißlungenen Eruptionen", bis die Vereinigung mehrerer Dampfblasen eine größere Wassersäule hebt, und dadurch den Druck in der Tiefe des Rohres so vermindert, daß dort plötzlich eine große Dampfmenge entsteht und das Wasser bis 40^{m} hoch schleudert.

Die Eisströme oder Gletscher. Mit wachsender Höhe nimmt die Temp. ab; folglich sind die höheren Theile hoher Gebirge so kalt, daß der dort im Winter gefallene Schnee während des Sommers nicht wegschmilzt; die Grenzlinie, oberhalb deren der Schnee im Sommer den Boden bedeckt, nennt man die Schneegrenze; ihre Höhe hängt von der geogr. Breite ab, sie liegt bei zunehmender Breite immer tiefer; so ist sie am Aeq. 5000^{m}, in Feuerland und Lappland nur = 1000^{m}. Doch hängt sie auch von der Menge der Niederschläge ab, liegt bei stärkeren Schneefällen tiefer; so ist sie z. B. am Südabhange des Himalaya tiefer als am Nordabhange. Die nicht schmelzende Schneemasse wird durch Regen- und Schneewasser, mit dem sie zusammenfriert, in eine körnige Masse, den Firn verwandelt, und endlich in die von der Höhe ausgehenden Thäler hineingedrängt, wo sie Eisströme oder Gletscher bildet, die in den Thälern meilenweit und bis Tausende von m unter die Schneegrenze herabgehen, in einer Mächtigkeit von mehreren Hunderten m die ganze Breite der Thäler erfüllend. Obwohl die Gletscher scheinbar aus compactem, prachtvoll blauem Eise bestehen, so sind sie doch körnig und von zahllosen Wasseräderchen durchzogen, und daher durch Regelation (409.) gegen Druck plastisch, füllen jede Thaländerung aus, bewegen sich als plastische Masse wie ein Strom mit einer Geschw. von 50—200^{m} im Jahr das Thal hinab, und nehmen, obwohl sie bei jeder Dehnung reißen, so zu tiefen Gletscherspalten Veranlassung geben und bei einigermaßen starkem Gefälle zu Gletschercascaden zertrümmern, doch unterhalb solcher Stellen wieder compacte Form an. Die Ursache dieser Bewegung ist die Schwere und der Druck von oben, auch der Druck des gefrierenden und sich ausdehnenden Wassers in den Haarspalten, welches aber nur dadurch gefriert, daß nach der Theorie der Regelation der Druck den Gefrierpunkt des Eises also auch dessen Temp. erniedrigt, während das ringsum liegende Wasser, das durch Spalten entweichen kann, nicht gepreßt ist und daher gefrieren muß. Die Geschw. des Gletschers ist im Sommer größer als im Winter, im Bette und am Rande kleiner als in der Mitte, weßhalb quer gezogene gerade Streifen sich bald in der Mitte nach unten krumm biegen. Von den Thalwänden herabfallende Steine und Erdmassen bilden allmälig zur Thalrichtung parallele Wälle, die Seitenmoränen, aus denen bei der Vereinigung zweier oder mehrerer Gletscher Mittelmoränen entstehen, während sie am Ende des Gletschers, wo aus blauem Eisthore ein Bach hervorquillt, sich zu hügelartigen Endmoränen vereinigen (Gletschertische, Gletschermühlen, Schliffe). 589

Daß die Gl. so tief unter die Schneegrenze herab, bis in die Nähe menschlicher Wohnungen gehen, liegt darin, daß sie in den Thälern weniger stark von den Sonnenstr. getroffen werden, während doch zum Schmelzen des Eises eine so große Wärmemenge nöthig ist; so reicht der Grindelwaldgletscher bis zu 1000^{m} herab. Der mächtigste Alpengletscher, das Eismeer, entsteht durch Vereinigung dreier Eisthäler, hat daher 4 Moränen; auch hat es drei Cascaden, am großartigsten ist die des unteren Endes, des glacier des bois; eine gewaltige Mittelmoräne mit colossalen Steinblöcken hat der Unteraargletscher, der durch Vereinigung der 2 Firnfelder des Schreckhorns und des Finsteraarhorns entsteht. Das Mer de glace ist mehr als 2 M. lang, 1000^{m} breit und wohl 500^{m} hoch, der untere Abhang, der glacier des bois, sieht noch wie ein Eisberg aus. Außer den Moränen sind noch die Gletschertische anzuführen, große Steinblöcke, unter denen das Eis nicht, wie sonst ringsum schmelzen kann, und welche daher auf Eissäulen ruhen, die später prasselnd einstürzen. Dünne Platten oder dunkle Erdhaufen saugen die Wärme stärker ein, sinken daher in den G. bis an sein Bette und werden dort durch den gewaltigen Druck zu feinem Staub zerrieben, der den Gletscherbach trübt; vorher schneiden sie lange Risse in das Gletscherbett, das von der

Eisbewegung sonst glatt geschliffen ist. An diesen Gletscherschliffen kann man verlassene Gletscherbette erkennen. Die Bewegung der G. hat man an Gegenständen und Gebäuden erkannt, die man in ihren oberen Theilen angebracht hat. So ließ Saussüre 1788 eine Leiter auf dem Col du géant zurück, welche 44 J. später in Stücken weit unten wieder gefunden wurde und daher jedes J. nahe 100m zurückgelegt hatte; auch werden die gewaltigen Endmoränen öfter nach starken Schneejahren weit fortgeschoben, ein Zeichen für die Kraft des G. Umgekehrt ziehen sich in schneearmen Zeiten die Gletscherenden zurück, wie z. B. jetzt sämmtliche Schweizergletscher kleiner sind als im vorigen Jahrh. Die Bewegung zeigt sich auch noch darin, daß wegen der geringeren Geschw. der Ränder diese in zahllose Spalten zerklüftet sind. In der Eiszeit gingen die G. bis in den Jura und nach Süddeutschland; man sieht dies nicht nur aus Gletscherschliffen, sondern auch aus Endmoränen, aus denen manche Berge der Vorschweiz bestehen, sowie aus fortgeführten Steinblöcken von Alpengranit, die sich z. B. im Jura finden. Die Kiölengletscher gingen damals, wie jetzt in Grönland, bis in das Meer herab, das Rußland und Deutschland überfluthete; von deren Enden rissen sich Eisberge los, welche norwegische Granitblöcke mit forttrugen, die lange Zeit unter dem Namen Findlinge, erratische Blöcke, Hünengräber für die Geographen ein Räthsel waren. Die Gletschermühlen, runde Gruben im Gletscherbette, welche der stürzende Gletscherbach durch umgetriebene harte Steine allmälig ausgeschliffen hat, und andere Gletschererscheinungen sind im Gletschergarten zu Luzern blos gelegt.

2. Bewegungen der Erdrinde.

590 1. **Die Vulkane** sind kegel- oder kuppelförmige Berge, aus denen von Zeit zu Zeit Säulen von Dampf, Rauch oder Staub, mit Steintrümmern und -Blöcken vermischt, bis zu Tausenden von m Höhe aufsteigen, während aus der vulkanischen Oeffnung, Krater genannt, gluthflüssige Gesteinsmasse hervorbricht und an den Seitenwänden herabrinnt, wo auch häufig Schlammströme langsam abfließen; die gluthflüssigen Ströme nennt man Lava, die Steintrümmer Lapilli, die abgerundeten Blöcke Bomben. Nicht immer treten alle genannten Erscheinungen auf; z. B. bei dem seit historischen Zeiten größten Ausbruch auf der Sundainsel Krakatoa am 27—29. August 1883 fehlte die Lava, dagegen wandelte der Staub auf Hunderte von M. den Tag in Nacht, begrub mit Bimssteinlapilli zusammen die nähere Umgebung in haushohem Schutt viele Meilen weit und bedeckte eine Fläche größer als Deutschland. Die helle Dampfsäule, welche oft lange vor der eigentlichen Eruption aus dem Krater aufwirbelt, besteht hauptsächlich aus Wasserdampf, enthält jedoch nach Bunsen auch Schwefeldampf, Salzsäure, Salmiak. Die Rauchsäule, welche den Beginn der eigentlichen Eruption anzeigt, entsteht aus oder neben der Dampfsäule, breitet sich oben pinienartig nach allen Seiten aus, besteht aus feinem Staub, der unter dem Mikroskop aus glasigen und blasig-schaumigen Splittern und augitischen Körnchen zusammengesetzt erscheint; die Möglichkeit der Entstehung noch feineren Staubes bei der stärksten Eruption muß zugegeben werden; derselbe oder der Wasserdampf könnte bis in Höhen von 10—20000m geschleudert werden, dadurch in die ungemein heftigen Oberströme der Atmosphäre gerathen und von diesen allmälig über die ganze Erde geführt werden, wodurch das stundenlang dauernde Himmelsglühen Abends und Morgens nach der Eruption in der Sundastraße 1883—84 erklärlich scheint, da auch nach anderen Vulkanausbrüchen Aehnliches beobachtet wurde. Das Herannahen einer Eruption wird durch Erdbeben, dumpfes, unterirdisches Rollen, Versiechen von Quellen und Brunnen in der Nachbarschaft angedeutet; der Schlund des Kraters, der aus erhärteter, oft noch rothglühender Lava besteht, hebt und senkt sich, aus Gluthspalten und kleinen Kegeln (Fumarolen) steigt der Dampf auf, endlich zerbricht die Lavadecke, Dampfmassen und Lavasäulen wirbeln empor, bis endlich unter brüllendem Tosen, das oft Hunderte von M. gehört wird (beim Krakatoa in einem Kreise von 3333km Durchm.), zahllose Steintrümmer und Lavablöcke mit dem Staube zusammen Tausende von m em-

vorgeschleudert werden, während die fortwährend steigende Lava aus der Kratermündung oder aus Seitenöffnungen als feurig flüssiger Strom langsam und alles verwüstend oft mehrere Meilen fortfließt und die Hitze noch Jahre lang in sich trägt. Aus der Rauchwolke zucken Blitze und strömt der Regen, der mit dem rückfallenden Staub die Schlammströme bildet, die verheerend wie die Lavaströme wirken und zu Tuff, Traß, Puzzolane erstarren. Die zurückfallenden Gesteinsmassen erhöhen den Vulkan, ja bauten ihn sogar erst auf, während die innen anleckenden Lavamassen ihn lösen, so daß er eigentlich ein nach unten dünner werdender Kegelmantel ist, der schließlich einstürzt und ein Ringgebirge zurückläßt. Finden innerhalb desselben neue Ausbrüche statt, so ist der neue Vulkan von einem zertrümmerten Walle umgeben, wie der Pic von Teneriffa seinen Circus hat und der Vesuv seine Somma; sind aber die Bedingungen des Vulkanismus nicht mehr vorhanden, und wird das tiefe Einsturzbecken von Wasser erfüllt, das von den rings aufsteigenden Hügeln herabrinnt, so entstehen vulkanische Bergseen, wie die Maare der Eifel (Laacher See) und die Kraterseen der Auvergne; steigt dagegen die gluthflüssige Masse im Inneren und füllt so nach und nach den Hohlraum, so ist der Vulkan erloschen; durch Erosion wird dann die ursprüngliche Kegelhülle beseitigt, und es bleiben wie im Siebengebirge Trachyt- und Phonolitkegel und -Kuppen zurück. Die Erklärung der Vulkane findet man jetzt ziemlich allgemein in dem feurigflüssigen Zustande des Inneren der Erde, in der Ueberhitzung, die das Wasser unter sehr hohem Drucke durch die Berührung des schmelzflüssigen Erdinnern annimmt, in der hohen Dampfspannung, die der aus überhitztem Wasser entstehende Dampf hat, und in den colossalen Dampfmengen, die sich aus Wasser im sphäroidalen Zustande plötzlich entwickeln, wenn der Druck stark vermindert wird; man nennt dies die plutonische Theorie der Vulkane.

Man theilt die Vulkane ein in thätige und erloschene Vulkane. Die erloschenen Vulkane haben wie das Siebengebirge meist noch Kegelform und bestehen aus vulkanischen Gesteinen wie Trachyt, Basalt und ihren Zwischenstufen, — oder sie haben auch noch ihre Krater, wie z. B. die Fallenlei, ihre Lava- und Schlammströme wie die Gegend des Laacher Sees und das Brohlthal; jedoch sind die Krater ganz mit Steinmasse erfüllt, die Lava ist ganz in Stein umgewandelt wie die Niedermendiger Mühlsteinlava, und auch die Schlammströme sind zu Tuffsteinen geworden. Die thätigen Vulkane sind an den offenen Kratern kenntlich; jedoch können auch erloschene Vulkane wieder thätig werden; so galt der Vesuv den Alten für erloschen, bis er 79 n. Chr. mit dem furchtbaren pompejanischen Aschenausbruch eine neue Thätigkeit begann. Fuchs zählt 672 thätige Vulkane, von denen 270 in unserer Zeit Ausbrüche hatten; die Zahl der erloschenen ist wohl 10 mal so groß. Die Vulkane sind selten isolirt, sondern stehen entweder als Centralvulkane um einen großen, wie die Isländer um den Hekla und wie die Canarischen um den Pic, oder sie bilden Reihenvulkane, die man sich auf einer gemeinsamen Erdspalte denkt, wie die 700 M. lange Vulkanreihe an der Westküste Südamerikas, die Vulkane von Sumatra, der Sundastraße und Java's; auch der Vesuv ist das südliche Ende einer Vulkanreihe, und der Aetna bildet mit den liparischen Inseln eine solche. Die Thätigkeit der Vulkane ist gewöhnlich nicht ununterbrochen; während der kleine Stromboli fast alle Viertelstunde einen Ausbruch hat, verfließen zwischen den Eruptionen das Aetna 10—12 Jahre, und der Vesuv hat sehr unregelmäßige Pausen; vor dem zweiten großen Ausbruch von 1631 hatte er 300 Jahre lang geruht und hat seitdem alle 3—4 Jahre eine Eruption. Da die meisten Vulkane im Meere oder in der Meeresnähe stehen und ungeheure Mengen von Wasserdampf ausstoßen, so hält man das Wasser für ein Hauptagens derselben.

Außer den erwähnten Eigenschaften des Wassers und des Wasserdampfes benutzt die plutonische Theorie der Vulkane das schmelzflüssige Innere der Erde. Schon die Vulkane selbst, die an den verschiedensten Stellen der Erde feurig flüssige Massen ergießen, lassen vermuthen, daß das Erdinnere schmelzflüssig ist; dazu kommen die warmen Quellen, die um so heißer sind, aus je größerer Tiefe sie emporsteigen, und endlich zeigen die Bergwerke, die Tunnels und Bohrlöcher, daß die Temp. der Erdrinde für je 100^m Tiefe um 3° zunimmt. Zwar hat der tiefste Bergwerksschacht der Erde (Pribram in Böhmen) nur eine Tiefe von 1000^m und das tiefste Bohrloch (Sperenberg bei Berlin) nur 1300^m Tiefe; allein bis da-

hin erstreckt sich doch die regelmäßige Zunahme der Temp. mit der Tiefe, die geothermische Tiefenstufe, 33m für 1°; wenn dieselbe nun auch nach und nach größer wird, wenn in größeren Tiefen, wie die Theorie beweist, die Temp. weniger stark zunimmt, so kann doch unmöglich die feste Erdrinde eine größere Dicke als 20 M. haben, das Erdinnere muß schmelzflüssig, eine Pyrosphäre sein. — Durch die Spalten und Risse der Erdrinde kann das Wasser der Meere und Flüsse tief in die Erdrinde eindringen und wird durch den ungeheuren Druck, der auf ihm ruht, selbst durch capillardünne Gefäße bis an die Pyrosphäre getrieben, ohne denselben Weg zurück zu können, weil dafür die Capillarspalten zu dünn und der Gegendruck des Oberwassers zu groß ist. Unter diesem ungeheuren Druck von Tausenden von at kann das die Pyrosphäre berührende Wasser trotz der hohen Temp. derselben nicht sieden, muß daher mit der schmelzflüssigen Masse ein höchst inniges Gemenge, das sogenannte Magma, bilden, in welchem das Wasser und daher auch das Magma selbst im sphäroidalen Zustande sein muß. Von der ursprünglichen Entstehungsstelle breitet sich das Magma in der obersten Schicht der Pyrosphäre nach allen Seiten aus; gelangt es bei seiner Ausbreitung in immer weiteren Kreisen endlich an eine dünnere Stelle der Erdrinde z. B. an einen Krater, so muß es durch den Druck der Erdrinde in demselben allmählig steigen; dadurch wird aber an dieser Stelle der Druck von oben nach unten kleiner, weshalb das Wasser sich in Dampf verwandelt und aus den Rissen und Capillargefäßen des Kraterschlundes aufsteigt und die Dampfsäule bildet; dieselbe kann lange Zeit allein vorhanden sein, da das Magma sich nur langsam bildet und daher auch langsam im Krater steigt. Ist dasselbe und mit ihm der alte Kraterschlund zu einer Säule von passender Höhe angewachsen, so beginnt mit Dampfbildung und Druckverminderung ein ähnliches Spiel wie beim großen Geiser. Da die oberste Schicht nur einen geringen Druck erfährt, so kann sich das überhitzte Wasser derselben in Dampf verwandeln und dadurch die oberste Schicht heben; dabei muß nothwendig der Dampf entweichen und die erste Schicht wieder sinken, was sich oft wiederholen kann und das Auf- und Abwogen der Lava erklärt. In dem Moment des Dampfentweichens und Magmasinkens kann es aber einmal vorkommen, daß der Druck der obersten Schicht auf die folgende aufgehoben ist, wodurch in dieser eine stärkere Dampfentwicklung stattfindet; dieselbe kann jetzt mit der obersten Doppelschicht dasselbe Spiel treiben und dadurch den Druck auf tiefere Schichten plötzlich stark vermindern; dann entsteht hier eine massenhafte Dampfentwicklung, die sich im Nu auf einem großen Theil des Magma ausbreitet und wegen der großen Tiefe und hohen Temp. Dampf von der höchsten Spannung erzeugt, der in Strahlen durch das obere Magma schießt, es in Staub verwandelt, mit in die Höhe reißt und so die Rauchsäule bildet, deren Dampfstrahlen nicht nur die Lavadecke zerreißen und Stücke von der Größe von Felsblöcken mit in die Höhe führen, Lavaklumpen ausschleudern, die in der Luft zu Bomben werden, sondern auch durch den Druck auf das untere Magma dasselbe zum Aufsteigen und Ausfließen bringen. — Daß das gluthflüssige Magma die unteren Kraterwände von innen löst und verdünnt, ist wegen seiner langen Wirksamkeit an dieser Stelle leicht verständlich; so entstehen durch Einsturz die Ringgebirge und verschwinden benachbarte Berge oder Inseln; beim Ausbruch des Krakatoa verschwanden zwei nahe Vulkane ganz und einer halb im Meere. Hierdurch sowie durch das Erdbeben selbst entstand eine so gewaltige Fluthwelle, daß das Wasser über die benachbarten Inseln stürzte und 30 000 Menschen sowie unermeßliches Gut begrub, während die Lufterschütterung sich in den folgenden 5—6 Tagen als Barometerschwankung 3 mal um die ganze Erde fortpflanzte.

Durch Einwirkung der Tiefenhitze auf das Sickerwasser können auch Dampfquellen entstehen, die noch andere Stoffe gelöst enthalten, wie der Dampf des Volcano borsäurehaltig ist; häufig sind diese Fumarolen in Oberitalien, auf Neu-Seeland und in Island. Wirkt das heiße Sickerwasser auf ein kalk- und kieselsäurehaltiges Gestein, so ist die Entstehung von Kohlensäure veranlaßt; solche Mofetten erklären die Hundsgrotte bei Neapel, das Todesthal auf Java u. s. w.; nicht vulkanisch sind die Kohlenwasserstoffquellen, Oelquellen und kalten Schlammvulkane; sie rühren von der trockenen Destillation in die Erde versenkter Pflanzenmassen her; dagegen sind auch die heißen und salinen Schlammvulkane plutonischen Ursprunges.

591 2. **Hebung und Senkung der Erdrinde, Entstehung der Continente und Gebirge.** Wie jetzt noch an zahlreichen Stellen der Erde Hebungen oder Senkungen der Erdoberfläche stattfinden, indem früher vom Meere bedeckte Erdstellen nach und nach über den Uferrand steigen, oder alte Landstrecken ganz unter der Meeresfläche verschwinden, so geschah es auch in der Urzeit; dadurch entstanden die Meere und Continente. Die Grundursache ist die Pyrosphäre und die Ausstrahlung ihrer Wärme in den Weltraum; durch die mit der Abkühlung verbundene Contraction wird das Volumen der Pyrosphäre kleiner, die Erdrinde wird für den schwindenden

Kern zu groß, wodurch **Faltung** und Runzelung derselben eintritt, welche die Gebirge und Hügel bilden. Wie in einem Gewölbe der vertikale Druck einen horizontalen Schub erzeugt, der durch die Strebepfeiler aufgehoben wird, so erzeugt auch das Streben der gewölbten Erdrinde, nach dem Centrum hinzusinken, einen wagrechten Druck, der die Erdrinde zu Gebirgen faltet (Faltungstheorie).

Während sich die Küste von Schweden und Norwegen hebt, in 100 Jahren etwa 1/3 bis 1m, senkt sich die Küste von Deutschland und Frankreich; in Schweden fahren alte Leute auf Landstraßen, deren Boden sie in ihrer Kindheit nur als Meerbusen sahen, und in Deutschland sind die Sagen von versunkenen Städten, sowie zahlreiche neue Buchten und Meere bekannt genug; solche säculare, d. i. sehr langsame Hebungen und Senkungen kommen an allen Meeresküsten vor; doch gibt es auch raschere Veränderungen; so sieht man aus den Bohrmuschelnarben der drei Säulen des Serapistempels bei Puzzuoli, daß sich dessen Boden seit christlicher Zeit zuerst um 8m gesenkt und seitdem wieder fast zum früheren Niveau gehoben hat. In der Urzeit der Erde waren die Hebungen und Senkungen jedenfalls viel rascher wechselnd und großartiger, da große Theile der Continente aus submarinen Ablagerungen bestehen, die häufig mit Schichten abwechseln, die sich aus süßem Wasser abgesetzt oder aus Sümpfen gebildet haben. In den großen Weltmeeren des Südens dauert ein stärkeres Sinken immer noch fort, und wenn auch der Theorie nach den Continenten ein schwaches Sinken zugeschrieben werden muß, so scheinen doch die meisten Gebirge durch das Fortdauern der Faltung noch zu wachsen, obwohl sie den Angriffen von Luft, Wasser und Eis ausgesetzt sind und daher durch Verwitterung und Erosion fortwährend verlieren.

Die Gebirgsfalten sind als Ein- und Ausbiegungen der Erdschichten durch die Eisenbahnbauten bloßgelegt, so daß an ihrer allgemeinen Existenz nicht zu zweifeln ist; bei einer Rheinfahrt läßt sich die Faltung leicht verfolgen, da der Strom sie durchbrochen hat; das rheinische Schiefergebirge gehört zu den ältesten Faltungen, da die Rippen durch Erosion bis zur Tiefe der Rinnen verwittert sind und die hügelige Hochebene von Nassau bilden; bei Aachen sind sogar die Falten von Trias- und Kreideschichten bedeckt, bilden eine Tiefebene, unter welcher die Faltung durch das Auf- und Absteigen der Kohlenschichten in den Bergwerken erkannt wird; jüngere Faltungen bilden die Alpen und den Jura. — Die Faltenbildung ist schon von Hall (1813) künstlich nachgeahmt worden, in neuerer Zeit deutlich von Alph. Favre durch eine gespannte, mit plastischem Thon bedeckte Kautschukplatte, die bei langsamer Contraction die Rippen und Rinnen der Gebirge nachahmt.

3. **Die Erdbeben** sind plötzliche Erschütterungen der Erdrinde, deren Ursprungsort oder **Centrum** 10 bis 30km unter der Erdoberfläche liegt, und welche sich nach den Gesetzen der Wellenbewegung mit einer Geschwindigkeit von 300—500m fortpflanzen; das **Epicentrum**, die stärkst bewegte Stelle der Erdoberfläche, ist oft der Mittelpunkt eines **Erschütterungskreises** von mehreren Hundert M. Halbmesser. Man unterscheidet nach der Art und Richtung der Bewegung stoßende oder succussorische Erdbeben, vertikale oder schiefe Stöße der Erdrinde, dann undulatorische, wellenförmig schwankende Bewegungen des Bodens, und rotatorische oder drehende Erdbeben, der seltenste aber schrecklichste Fall. Nach neueren Erfahrungen rechnet man durchschnittlich 2 Erdbeben auf einen Tag; an Küstenländern sind sie häufiger und zerstörender, aber auch in Binnenländern nicht selten, in Gebirgen häufiger als in Ebenen. Der Entstehung nach theilt man die Erdbeben in Vulkanbeben, Einsturzbeben und geotektonische Erdbeben (Sueß und Hörnes 1873—78).

Zur Ermittelung der Richtung und Stärke der Erdbeben dient das **Seismometer** (Seismograph), das eine verschiedenartige Constr. hat. Aus seinen Angaben und den Orten, die zu gleicher absoluter Zeit das Erdbeben erleiden, ermittelt man die Lage des Epicentrums und des Centrums, sowie auch die Geschw. der schwingenden Theile der Erdoberfläche. Denn auf dieser Schwingungsgeschw. und nicht auf der Fortpflanzungsgeschw. beruht die zerstörende Gewalt eines Erdbebens. Mallet fand sie für das calabrische (1857) Erdbeben = 2,5m. Da im Innern der Erdrinde die Theile unmöglich so große Bewegungen ausführen können, so ist die Wirkung des Erdbebens erst an der Erdoberfläche merkbar; in Bergwerksschachten, tiefen Brunnen, ja selbst in Tunneln spürt man wenig oder nichts. Die Erdoberfläche aber und die Gegenstände auf ihr, die nur Luft sich gegenüber haben, müssen diese Bewegung plötzlich annehmen; die Gewalt dieses plötzlichen Ruckes vermag selbst Schiffsmaste auf der Meeresfläche zu zersplittern; Städte, die in der Nähe des Epicentrums liegen, werden im Nu in Schutthaufen verwandelt (Lissabon 1755, Catania 1783, Caracas

1812, Casamicciola 1883). Lose Gegenstände werden fortgeschnellt, Felsmassen losgelöst und herabgestürzt, Erdrisse erzeugt, oft auch wieder geschlossen, bleibende Senkungen oder Hebungen finden statt, lose Erde, Sand, Schlamm, Wasser werden fortgeschleudert, so daß Erdtrichter oder brunnenartige Vertiefungen entstehen, Quellen versiechen oder entstehen. An Meeresküsten zieht sich das Wasser erst zurück und stürzt dann mit einer haushohen Fluthwelle über das Ufer, welche oft mehr Menschen tödtet als das Erdbeben selbst, während auch über das Meer ein Erdbebenschwall bis in ferne Welttheile geht.

Früher suchte man nach einer einheitlichen Grundursache aller Erdbeben; die einen fanden sie im Vulkanismus, die anderen im Neptunismus; jetzt hält man dafür, daß die Erdbeben verschiedenen Ursprunges sind, und daß die stärksten und ausgebreitetsten von der fortdauernden Faltung der Erdrinde herrühren. Die Einsturzbeben werden eingeleitet durch allmälige Bildung von Erdhöhlen, entweder durch Erosion des Sickerwassers, oder durch die entleerende Wirkung der Vulkane oder durch Menschenhand wie z. B. mittels der Bergwerke. In Ischia treffen alle 3 Wirkungen zusammen, so daß die verheerende Wirkung von 1883 wohl einem Einsturz der unterhöhlten Erdmassen zugeschrieben werden kann; sicher aber erklärt diese durchgängige Unterhöhlung den kleinen Erschütterungskreis dieses verwüstenden Phänomens, da es nicht einmal an dem so nahen Vesuv verspürt wurde. Gewiß gehören auch die Erdbeben des Visp-Thales in Wallis (1855) hierher, da dort 3 gypsreiche Bäche fließen, von denen einer dem Boden jährlich 200cbm Gyps entzieht. — Die Vulkanbeben finden in vulkanischen Gegenden vor den Ausbrüchen, aber nicht nach solchen statt, sind also Folge des übermäßig hochgespannten Wasserdampfes, der seinen Ausweg durch den Krater sucht, weßhalb dieser auch das Centrum bildet. — Die geotektonischen Erdbeben sind erst seit 10 Jahren durch Sueß und Hörnes ergründet worden. „Verwerfung der Schichten" ist ein dem Bergmanne bekanntes Wort, da häufig genug, z. B. eine ausgebeutete Kohlenschicht plötzlich wie abgebrochen an einer Spalte, einem Erz- oder Mineralgang ein Ende hat, und meist höher oder tiefer wieder aufgefunden wird; daraus folgt, daß bei der fortdauernden Faltung der Erdrinde oft ganze Schichtengruppen zerbrochen und mit den Bruchflächen gegen einander verschoben werden; der gewaltige Druck, der diese Wirkung auszuüben vermag, äußert sich in gleicher Stärke auf die über- oder unterliegenden Erdschichten als Erdbeben. Die östreichischen Geologen haben gezeigt, daß die Beben des Alpen- und Karstgebietes ihre Centra auf gewissen Schütterlinien haben, die den Hauptbrüchen der Gebirge folgen, und da diese den Gebirgzügen parallel oder transversal verlaufen, so unterscheiden sie Querbeben und Längsbeben. Für die Richtigkeit dieser Theorie spricht besonders die Thatsache, daß junge Erdgebiete mit ungestörten Schichtenlagen, wie Norddeutschland, das europäische Rußland, Sibirien frei von Erdbeben sind, während alte gebirgige Meeresküsten von Vulkanen und Erdbeben am meisten heimgesucht werden; denn der Boden des hohen Weltmeeres erhält von allen Flüssen unaufhörlich Zufuhr, die Erdrinde ist dort und auf den Continenten dicker als am Meeresstrande, der durch die unaufhörliche und heftige Erosion des Meeres und seiner Brandung fortwährend schwächer wird und daher dem Wasserdampf der Vulkane und dem Faltungsdruck am leichtesten erliegt.

Zwölfte Abtheilung.

Die Physik der Luft (Meteorologie).

1. Das Licht der Luft.

592 **Die Tageshelle und die Dämmerung.** Die Tageshelle besteht darin, daß alle Theile der Atm. der Tageshälfte der Erde leuchten, auch diejenigen, welche nicht direct von Sonnenstrahlen getroffen werden. Sie entsteht dadurch, daß nicht blos Staub- und Wassertheilchen und Wolken, sondern auch die Theilchen der Atm. das Licht nach allen Seiten reflectiren oder zerstreuen. Eine gleiche Ursache hat die Dämmerung, die Erscheinung, daß die Luft vor Aufgang und nach Untergang der Sonne hell ist; die oberen Luftschichten und die nach der Sonne zu gelegenen Luftmassen empfangen noch Sonnenstrahlen, wenn die Sonne unter dem Horizont eines Ortes steht, und diffundiren dieselben in die unteren Luftschichten. Die astronomische Dämmerung hat ihre Grenze in dem Zeitpunkte, wo die kleinsten mit bloßem Auge sichtbaren Sterne eben am Verschwin-

den sind, die bürgerliche Dämmerung in dem Zeitpunkte, wo das Lesen im Freien möglich ist. Durch Vergleichung des Sonnenstandes mit der astronomischen Dämmerungsgrenze hat sich ergeben, daß diese Grenze dann erreicht ist, wenn die Sonne 18° unter dem Horizonte steht.

Ohne die Atm. würde der Himmel auch bei T. ganz dunkel sein, die St. würden bei T. wie bei Nacht nur als leuchtende Punkte erscheinen, an jeder Stelle, die nicht von directen Sonnenstrahlen getroffen wird, würde Dunkelheit herrschen, und nach Untergang der S. würde sogleich völlige Nacht eintreten. Das durch reflectirtes Licht entstehende Leuchten der Atm. läßt zwar die St. bei Tage für uns verschwinden, bringt aber allgemeine Helligkeit und die Dämmerung hervor. Daraus, daß die Dämmerung durch eine Tiefe der S. von 18° begrenzt ist, hat man berechnet, daß in einer Höhe von 9 M. die Atm. entweder ganz aufhört oder, was wahrscheinlicher ist, wegen zu starker Verdünnung nur unmerkliches Licht reflectirt. Den parallel zum Hor. 18° unter demselben gelegten Kreis nennt man den Dämmerungskreis und die zwischen beiden Kreisen liegende Himmelszone die Dämmerungszone. Am Aeq. steht der Tageskreis der S. auf dem Hor. senkrecht, nach den Polen zu aber bilden beide Kreise einen immer spitzeren Winkel; daher geht am Aeq. die S. rasch durch die Dämmerungszone, braucht aber nach den Polen zu immer mehr Zeit, um bei ihrer immer schieferen Bahn vom Hor. bis zum Dämmerungskreise zu gelangen; deßhalb nimmt die Dämmerung mit der geogr. Breite zu, ist z. B. am Aeq. nur 1 St., in 45° 2 St., in 60° gar 3 St. lang; am Aeq. wird es gleich nach Sonnenuntergang dunkel, verhältnißmäßig noch viel rascher, als man aus der angegebenen Dämmerungsdauer schließen sollte; daraus folgt, daß bei der Diffusion des Lichtes doch die Unreinheiten der Atm., die Wasser- und Staubtheilchen, eine Hauptrolle spielen, da in der reinen Luft der tropischen Zone solche Theilchen nur in geringem Maße vorhanden sind. Auch ist an einem und demselben Orte die Dämmerung nicht gleich lang für alle T. des Jahres, weil die Grade des Tageskreises eine verschiedene Länge haben und auch mit verschiedener Geschw. durchlaufen werden. So ist am Aeq. selbst die Dämmerung zur Zeit der Aequinoctien am kürzesten, zur Zeit der Solstitien am längsten; die Zeiten der kürzesten Dämmerung gehen für die nördliche Halbkugel mehr nach dem Wintersolstitium zu, und zwar um so mehr, je größer die geogr. Br. ist; so finden für Berlin die kürzesten Dämmerungen am 1. März und 12. Oct. statt. Da die längste Dämmerung für so nördliche Gegenden in die Zeit der kurzen Nächte fällt, so wird es in denselben eigentlich nie vollständig Nacht. Am Nordpole dauert die Dämmerung 100 T., und auch die langen Nächte der anderen polaren Gegenden werden wesentlich durch die Dämmerung verkürzt. — Die Gegendämmerung ist ein matter Lichtschein der eigentlichen Dämmerung gegenüber, herrührend von der Inflexion der Lichtstrahlen in den Schattenraum der Erde. — Die auf der Brechung des Lichtes durch die Luft beruhende astr. und terrestrische Strahlenbrechung und Fata Morgana, das Funkeln und das Schwanken der St. wurden in 298. betrachtet, die auf der totalen Reflexion beruhende Luftspiegelung in 299., die platte Form des Himmels und die hierdurch erzeugte Verkleinerung der Himmelserscheinungen nach dem Zenit zu in 353.

Das Himmelblau und das Morgen- und Abendroth sind Interferenzfarben, **593** welche durch die kleinen durchsichtigen Wassertheilchen, die entweder in Form unendlich kleiner Tröpfchen oder in Form sehr kleiner Bläschen in der Luft schweben, hervorgebracht werden. Der reine Wasserdampf gibt der Luft ihre größte Klarheit und Durchsichtigkeit; ist der Wasserdampf aber zu Wasser condensirt, so erzeugt das von den kleinen Wassertheilchen reflectirte Licht durch Interferenz das Himmelblau und das durchgelassene Licht die Röthe des Himmels, vorausgesetzt, daß die Bläschen nicht über eine gewisse Größe und Menge hinausgehen, weil sie dann den Himmel um so weißlicher färben, je größer ihre Anzahl ist, und endlich das Grau des Nebels und der Wolken hervorbringen. Das Himmelblau und das Abendroth bilden die zwei Theile von Goethes Urphänomen: Jedes trübe d. i. schwach beleuchtete Medium erscheint vor Dunkel blau, vor Hell dagegen roth. Das Himmelblau und das Augenblau haben dieselbe Ursache, welche auch den blauen Anhauch ferner Berge und das Dunkelblau reiner Seen erklärt, sowie das Blau der Adern, der Rauchwölkchen u. s. w.; das Abend- und Morgenroth findet sein Gegenbild in der rothen Färbung, welche die Sonne hinter einer Dampfwolke, ein Licht hinter dem Schwaden kochenden Wassers, Cigarrendampf vor einem weißen Blatt Papier annimmt.

Früher erklärte man die beiden Erscheinungen durch die Annahme, daß die Luft zugsweise Blau reflectire und Roth durchlasse. Forbes entdeckte zuerst das Roth der S hinter der Dampfwolke eines Locomotivenventils und beobachtete auch, daß nur in der des Ventils das Roth auftrat, daß in größerer Entf. aber die Dampfwolke weiß und durchsichtig erschien, und daß demnach zur Erzeugung des Roth die Größe und Men Dampfbläschen unter einer gewissen Grenze bleiben müsse. Clausius zeigte dann, wie von den dünnen Häutchen der Wasserbläschen reflectirte Licht Blau erzeuge, ähnlich wie den Seifenblasen Blau die Hauptfarbe sei. Daß der condensirte Wasserdampf die scheinungen hervorbringt und nicht die Luft, darauf deuten die Thatsachen, daß in den tropischen Gegenden, wo die Luft immer reiner wird, auch das Blau immer herrlicher dunkler, in nördlichen Gegenden immer milchiger erscheint, daß der Himmel im Zenit blau ist als am Horizont, daß im Winter das Blau weißlicher wird, daß Herbstabende brillanteste Abendroth erzeugen, daß auf Abendroth und Morgengrau schönes Wetter während Morgenroth Regen anzeigt. Im letzten Falle ist die Luft nämlich so feucht, sie schon vor der durch die S. erzeugten Verdunstung Condensationen möglich macht, also in noch höherem Maße nach derselben. Vor dem Abendroth aber enthielt die wenig Feuchtigkeit, daß selbst die durch die ganze Tageswärme der Erde entführte Dampfmenge nur die geringe für das Abendroth nöthige Condensation herbeiführen konnte.

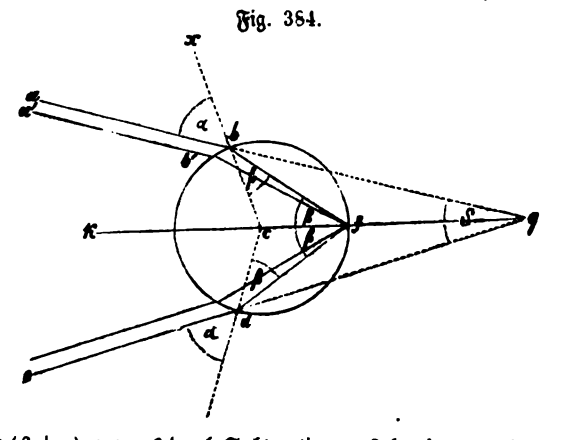
Brücke gab folgende Erklärung für das Urphänomen: Trübe Medien sind solche durchsichtige Stoffe, welche sehr kleine Theilchen anderer durchsichtiger Stoffe enthalten. Denken wir uns ein solches Theilchen unendlich klein und von Lichtstrahlen getroffen, so wird an der Vorderwand des Theilchens Licht reflectirt, wie auch an der Hinterwand; an der Vorderwand geschieht die Reflexion durch ein dichteres Medium, an der Hinterwand aber durch ein dünneres Medium. Nach den Gesetzen der Refl. wird die Welle eines an einem dichteren Medium refl. Strahles um eine halbe Wellenlänge durch die Refl. verzögert, dagegen an einem dünneren Medium nicht; da hier die Vorder- und Hinterwand zusammenfallen, so fällt auf die von der Hinterwand refl. Welle eine andere, die von dieser um eine halbe Wellenlänge verschieden ist; hierdurch fallen Berg und Thal auf einander und heben sich dadurch auf. Wären also die Theilchen wirklich an Größe = Null, so würde alles refl. Licht aufgehoben, die Luft müßte dunkel erscheinen. Sind aber nun die Theilchen nicht ganz, sondern nahezu unendlich klein, so wird die von der Hinterwand refl. Welle von der anderen um eine halbe Wellenlänge und um die doppelte Dicke des Theilchens abweichen. Da die blauen Strahlen die kleinsten Wellen haben, so kann diese Summe bei zunehmender Dicke der Theilchen zuerst für die blauen Strahlen eine ganze Wellenlänge ausmachen, wodurch diese Strahlen nicht mehr verlöscht, sondern verstärkt werden, während die Summe für die rothen, welche bekanntlich eine doppelt so lange Welle haben, nicht viel mehr als eine halbe Welle beträgt, wodurch dieselben noch vernichtet werden. Man sieht hieraus, daß die Theilchen, um Blau zu erzeugen, unter einer gewissen Größe bleiben müssen; denn werden sie größer, so wird auch das Roth mit den übrigen Farben entstehen, die mit dem Blau der kleinsten Theilchen sich zu Weiß vereinigen. Da die refl. Farben nicht durchgehen, so müssen bei dem von solchen Theilchen durchgelassenen Lichte die blauen Bestandtheile fehlen, wodurch eine orangefarbige Mischung entsteht, die das Morgen- und Abendroth erklärt.

594 **Der Regenbogen** ist ein concentrisch siebenfarbiger Kreisstreifen von etwa 41 Himmelsbogengraden Halbm., den man erblickt, wenn man die Sonne im Rücken und vor sich eine Regenwand hat. Der Mittelp. des Bogens liegt auf einer Geraden, die von der S. durch das Auge des Beobachters gezogen ist, also um so tiefer, je höher die S. steht, und im Hor., wenn die S. auf- und untergeht; in diesem Falle hat der Regenbogen Halbkreisform, in allen anderen Fällen ist er kleiner als ein Halbkreis. Die Breite des Regenbogens beträgt 2°20′; die Farben sind die des Sonnensp., das Violett nach innen, das Roth nach außen; die Farben sind nicht völlig getrennt, sondern decken sich theilweise. Häufig erscheint außerhalb des Regenbogens ein zweiter von matterem Glanze, umgekehrter Farbenfolge und 52° Halbm., der Nebenregenbogen; kleinere Bogenstücke heißen Regengallen.

Der Regenbogen entsteht dadurch, daß Sonnenstrahlen auf die Tropfen der uns gegenüber stehenden Wand fallen, an der Vorderfläche eines Tropfens gebrochen in denselben eindringen, von der Hinterfläche reflectirt werden und durch die Vorderwand abermals gebrochen austreten und in das Auge gelangen. Das sprach schon der Dominikaner Theodorich aus Freiberg i. S. im 14. Jahrh. aus, Cartesius berechnete aus dem Brechungsgesetze die angegebenen Zahlengrößen und Newton erklärte die Farben. Die in das Auge gelangenden Str. können nur dann einen zusammenhängenden Eindruck machen, wenn sie nicht divergent, sondern parallel in dasselbe eintreten; die Regenbogen erzeugenden Str., die wirksamen Str.

Sind also diejenigen, welche parallel auf den Tropfen fallend wieder parallel aus demselben treten. Es seien a b und a' b' (Fig. 384) solche Str.; der Einfallswinkel, den a b mit dem Radius cbx bildet, sei $= \alpha$ und der Brechungswinkel $= \beta$; dieser Str. wird nach f gebrochen, wo er unter dem W. β auftrifft und unter demselben W. β nach d reflectirt wird, wo, wie leicht ersichtlich, der Einfallsw. jetzt ebenfalls β ist, und daher der Str. de unter dem Brechungsw, α austreten muß. Der W. age $= \delta$ ist der W., den der einfallende mit dem austretenden St. macht, und agc $= \frac{1}{2}\delta$; da nun kcb oder 2β als Außenw. des Δ cbf, auch gleich der Summe von cbg oder α und cgb oder $\frac{1}{2}\delta$, so ist $\frac{1}{2}\delta = 2\beta - \alpha$. Gelten für den parallelen Str. a' b' dieselben, aber accentuirten Bezeichnungen, so $\frac{1}{2}\delta' = 2\beta' - \alpha'$. Wenn aber diese Str. wirksam sein, also parallel austreten sollen, so muß $\delta = \delta'$, also auch $2\beta - \alpha = 2\beta' - \alpha'$ sein, woraus $\alpha - \alpha' = 2(\beta' - \beta)$. Natürlich können nur solche St. zusammen in ein Auge gelangen, welche ganz nahe beisammen liegen, für welche also $\alpha - \alpha'$ ein sehr kleine Differenz x, und ebenso $\beta - \beta'$ eine sehr kleine Differenz y bilden, woraus durch Substitution in die Bedingsgl. des Regenbogens entsteht x = 2y. Nun stehen aber α uud β nach dem Brechungsgesetze in dem Zusammenhange $\sin\alpha = n \sin\beta$ und ebenso $\sin(\alpha + x) = n \sin(\beta + y)$, woraus durch Subtraction entsteht $\sin(\alpha + x) - \sin\alpha = n[\sin(\beta + y) - \sin\beta]$, oder nach bekannten goniometrischen Fln. $2 \sin \frac{1}{2}x \cos(\alpha + \frac{1}{2}x) = 2n \sin \frac{1}{2}y \cos(\beta + \frac{1}{2}y)$. Für sehr kleine Bogen darf statt des Sinus der Bogen gesetzt werden, und ebenso dürfen neben α und β in den Cosinussen die kleinen Summanden wegfallen; daher entsteht die Gl. $x \cos\alpha = ny \cos\beta$. Wird diese die Brechung darstellende Gl. mit der Gl. der Wirksamkeit x = 2y verbunden, so ergibt sich für die Größe der wirksamen Brechung die Gl. $2 \cos\alpha = n \cos\beta$ oder $4 \cos^2\alpha = n^2\cos^2\beta$; addirt man hierzu die Gl. der Brechung $\sin^2\alpha = n^2\sin^2\beta$, so entsteht $4 \cos^2\alpha + \sin^2\alpha = n^2(\sin^2\beta + \cos^2\beta)$ oder $1 + 3 \cos^2\alpha = n^2$, woraus $\cos\alpha = \sqrt{[(n^2 - 1)/3]}$. Setzt man hierin den Brechungsexp. n = 1,330 für rothe und = 1,343 für violette Str., so ergibt sich für erstere $\alpha = 59^\circ 35'$, $\beta = 40^\circ 25'$, für letztere $\alpha = 58^\circ 50'$ und $\beta = 39^\circ 35'$. Hieraus folgt für die rothen Str. die Ablenkung $\delta = 2\beta - \alpha = 42^\circ 30'$, für die violetten $= 40^\circ 40'$, woraus die Breite des Bogens $= 1^\circ 50'$; dies ist der Mittenabstand von Roth und Violett; da jeder Streifen die Breite der Sonne $= 30'$ hat, so muß für jeden Streifen noch die Hälfte dieses Maßes hinzu, wodurch die Gesammtbreite $= 2^\circ 20'$ erfolgt. Weil die Ablenkung für die rothen Str. größer sein muß als für die violetten, so kommt das Roth nur von höher gelegenen Str. ins Auge; daher ist Roth außen und Violett innen. Da alle Tropfen, welche die gleiche Lage gegen S. und Auge haben, auch die gleiche Ablenkung erzeugen, so entsteht Roth aus allen Tropfen, die 42° von der Verbindungslinie entfernt sind, die also auf einem Kreise liegen, dessen Radius 42° und dessen Centrum auf jener Linie sich befindet, woraus sich die Kreisform und die Größe erklärt, sowie die Thatsache, daß jeder Beobachter einen anderen Regenbogen hat. Der Nebenregenbogen entsteht durch Str., welche die Tropfen mehr unten treffen und nach zweimaliger Reflexion oben austreten, wodurch sich die höhere Lage und die umgekehrte Farbenstellung erklärt.

Fig. 384.



Höfe, Nebensonnen, Nebenmonde. Die Höfe sind helle, oft farbige Ringe um Sonne oder Mond, in welchen an Kreuzungs- und Berührungsstellen zweier Ringe häufig hellere Lichtmassen vorkommen, Nebensonnen und Nebenmonde. Man unterscheidet kleine Höfe oder Kränze und große Höfe; die Kränze haben einen Dm. von 2—5°, gehen selten über 10°, enthalten auch wohl die Regenbogenfarben mit Roth auf der Außenseite, und rühren von der Beugung des Lichtes an den Nebeltheilchen her, zeigen sich daher nur bei starker Trübung der Luft oder in einer dünnen vor S. und M. stehenden Wolke. Die großen oder eigentlichen Höfe bestehen aus einem Ringe von 22° Halbm., nach innen roth, nach außen in bläuliches Weiß 595

verlaufend; oft ist ein concentrischer Ring von doppeltem Halbmesser vorhanden, manchmal auch ein wagrechter durch S. oder M. gehender Streifen, der eigentlich ein Stück eines horizontalen, um den ganzen Himmel ziehenden Kreises ist; manchmal findet sich über oder unter dem eigentlichen Hofe ein zweiter oder dritter Kreis, der den ersten berührt; an den Berührungs- und Schnittstellen treten, doch nur selten, Nebensonnen und Nebenmonde auf. Die großen Höfe entstehen durch Brechung des Lichtes in den sechsseitigen Eisnadeln, aus denen die höchsten Wolken bestehen.

Die kleinen Höfe sieht man häufiger am M. als an der S., weil sie neben dem grellen Lichte derselben verschwinden; beobachtet man die Sonne öfter in einem Glasspiegel oder in einer Wasserfläche, so kann man die Kränze zuweilen wahrnehmen; man kann sie auch nachahmen, indem man ein Licht durch eine mit Bärlappsamen bestäubte Glastafel betrachtet oder das Spiegelbild eines Lichtes in einer etwas angelaufenen, durch einen Laden verdunkelten Fensterscheibe. Fraunhofer gab die mathematische Erklärung der hierbei vorkommenden Beugungserscheinungen und fand den Zusammenhang zwischen dem Dm. der Nebelbläschen und dem Radius der Hofringe; so ist der Radius des rothen Ringes $r = 0{,}0\,000\,25 : d$, wo d den Durchm. der Nebelbläschen bedeutet. Je kleiner also die Nebelbläschen sind, desto größer wird der Hof, was bei schönerem Wetter stattfindet; kleine Höfe zeigen das Vergrößern der Nebeltheilchen, also schlechtes Wetter an. — Sind die Eisnadeln, welche die großen Höfe erzeugen, sechsseitige Säulen, so bilden immer 2 einander nicht parallele Flächen ein Prisma von 60°, für welches das Minimum der Ablenkung 22° beträgt. Str. aber, welche das Minimum der Ablenkung bei parallelem Auftreffen erfahren, sind auch nach der Brechung parallel, verhalten sich also wie die wirksamen Str. des Regenbogens, wodurch sich die Form und Farbenfolge der Höfe erklärt. Durch solche Str., welche durch eine Seitenfläche und eine Grundfläche der sechsseitigen Säule gehen, also durch ein Prisma von 90° brechendem Winkel, erklärt sich der doppelt so große Ring, weil das Minimum der Ablenkung für ein Eisprisma von 90° nach genauer Beobachtung 46° beträgt. Der horizontale, durch die S. gehende Lichtstreifen von Sonnenbreite erklärt sich durch Reflexion der Sonnenstr. an verticalen Wänden der Eisnadeln, und in ähnlicher Weise sind durch Brechung und Reflexion die übrigen Erscheinungen der großen Höfe zu erklären.

2. Der Druck der Luft.

596 **Abnahme des Luftdrucks nach oben, barometrische Höhenmessung** (Pascal 1648). Der Luftdruck ist auf der Höhe der Meeresfläche, wie das Barometer angibt, durchschnittlich gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 760^{mm} Höhe, oder wie man sich kurz ausdrückt, gleich 760^{mm}. Nach oben wird, wie leicht erklärlich, der Luftdruck kleiner, weil die auf einer höheren Stelle ruhende Luftsäule eine geringere Höhe hat und aus dünnerer Luft besteht. Die Abnahme geschieht nach folgendem Gesetze: Wenn die Höhen in arithmetischer Progression wachsen, so nimmt der Luftdruck in geometrischer Progression ab.

Beweis. Es sei der Barometerstand, der ja bekanntlich den Luftdruck mißt, am Fuße einer h^m hohen Luftsäule b, auf dem Gipfel derselben b′, und in 1, 2, 3 .... Meter, also in arithmetischer Reihe steigender Höhe $= b_1, b_2, b_3 \ldots\ldots$, so ist $b - b_1$ die Höhe der Quecksilbersäule, die dasselbe Gewicht hat wie der unterste Meter Luft, ist also ein Maß für die Dichte dieses Luftmeters; ebenso sind $b_1 - b_2$, $b_2 - b_3$, $b_3 - b_4 \ldots\ldots$ die Dichten der folgenden Luftmeter. Da nun nach dem Mariotte'schen Gesetze sich die Dichten wie die Spannungen verhalten und diese gleich den äußeren Drucken, also gleich den Barometerständen b_1, b_2, b_3 u. s. w. sind, so ist $b - b_1 : b_1 - b_2 = b_1 : b_2$, oder nach Vertauschung der Mittelglieder $b - b_1 : b_1 = b_1 - b_2 : b_2$, woraus durch die Summenproportion folgt $b : b_1 = b_1 : b_2$; ebenso ergibt sich $b_1 : b_2 = b_2 : b_3$ und $b_2 : b_3 = b_3 : b_4$, also allgemein $b : b_1 = b_1 : b_2 = b_2 : b_3 = b_3 : b_4 \ldots\ldots$, womit der Satz bewiesen ist.

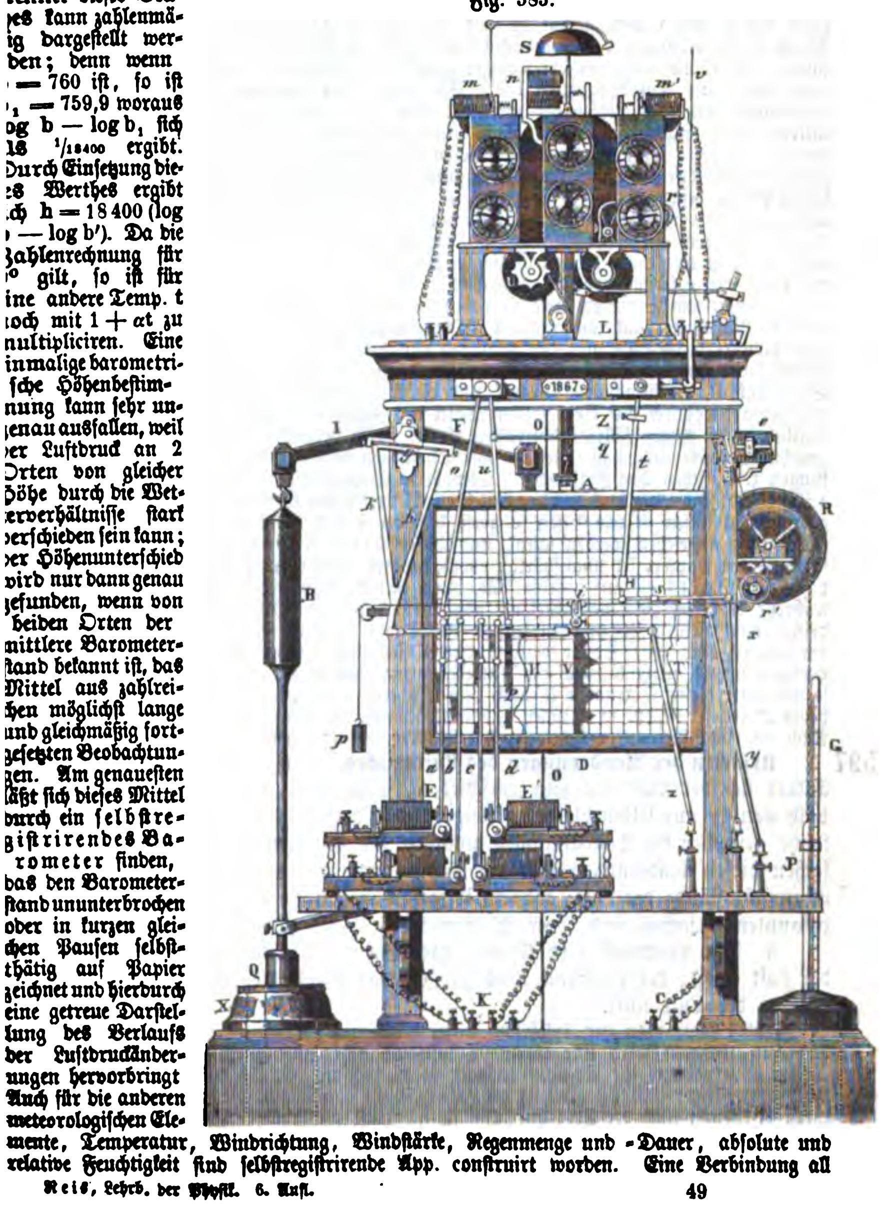
Damit ein Barometer, das man in die Höhe steigend mit sich führt, um 1^{mm} falle, muß man eine Luftsäule unter sich zurücklassen, die soviel wiegt wie 1^{mm} Queckſ.; nun ist aber die Luft 13,59 . 773 = ca. 10 000 mal leichter als Quecksilber; also wiegt eine Luftsäule von $10\,000^{mm} = 10^m$ Höhe soviel als 1^{mm} Quecksilber; das Barometer fällt um 1^{mm}, wenn man 10^m in die Höhe steigt, was man ganz gut beobachten kann an einem Aneroid, das man 2 Stiegen hoch trägt; demnach fällt in 100^m Höhe das Barometer um etwa 1^{cm}, und steht in 1^m Höhe auf $759{,}9^{mm}$, wenn es am Fuße der Höhe 760^{mm} zeigt.

Das Fallen des Barometers bei der Entfernung von der Erdoberfläche dient um Höhenmessen nach der Fl.

$$h = 18400\,(\log b - \log b')\,(1 + 0{,}003665\,t) \qquad (46)$$

Diese Fl. geht aus dem oben bewiesenen Satze hervor; in der geometrischen Progression $: b_1 = b_1 : b_2 = b_2 : b_3 \ldots$ ist b das 1. Glied, b_1/b der Reihenquotient, während die Gliederanzahl $= h + 1$ ist, da der Barometerstand $b' = b_h$ in der Höhe h stattfindet; also t nach der Progressionslehre $b' = b\,(b_1/b)^h$, woraus $\log b' = \log b + h\,(\log b_1 - \log b)$, lso $h = (\log b' - \log b)/(\log b_1 - \log b)$ oder $h = (\log b - \log b')/(\log b - \log b_1)$. Der Lenner dieses Bru- es kann zahlenmä- ig dargestellt wer- den; denn wenn $= 760$ ist, so ist $_1 = 759{,}9$ woraus og b — log b_1 sich ls $^1/_{18400}$ ergibt.)urch Einsetzung die- es Werthes ergibt ch $h = 18400$ (log — log b'). Da die Zahlenrechnung für ° gilt, so ist für ine andere Temp. t och mit $1 + \alpha t$ zu nultipliciren. Eine inmalige barometri- sche Höhenbestim- nung kann sehr un- enau ausfallen, weil er Luftdruck an 2 Orten von gleicher Höhe durch die Wet- erverhältnisse stark erschieden sein kann; er Höhenunterschied vird nur dann genau efunden, wenn von beiden Orten der mittlere Barometer- stand bekannt ist, das Mittel aus zahlrei- chen möglichst lange und gleichmäßig fort- gesetzten Beobachtun- gen. Am genauesten läßt sich dieses Mittel durch ein selbstre- gistrirendes Ba- rometer finden, das den Barometer- stand ununterbrochen oder in kurzen glei- chen Pausen selbst- thätig auf Papier zeichnet und hierdurch eine getreue Darstel- lung des Verlaufs der Luftdruckänder- ungen hervorbringt Auch für die anderen meteorologischen Ele- mente, Temperatur, Windrichtung, Windstärke, Regenmenge und -Dauer, absolute und relative Feuchtigkeit sind selbstregistrirende App. construirt worden. Eine Verbindung all

Fig. 385.



verlaufend; oft ist ein concentrischer Ring von doppeltem Halbmesser vorhanden, manchmal auch ein wagrechter durch S. oder M. gehender Streifen, der eigentlich ein Stück eines horizontalen, um den ganzen Himmel ziehenden Kreises ist; manchmal findet sich über oder unter dem eigentlichen Hofe ein zweiter oder dritter Kreis, der den ersten berührt; an den Berührungs- und Schnittstellen treten, doch nur selten, Nebensonnen und Nebenmonde auf. Die großen Höfe entstehen durch Brechung des Lichtes in den sechsseitigen Eisnadeln, aus denen die höchsten Wolken bestehen.

Die kleinen Höfe sieht man häufiger am M. als an der S., weil sie neben dem großen Lichte derselben verschwinden; beobachtet man die Sonne öfter in einem Glasspiegel oder in einer Wasserfläche, so kann man die Kränze zuweilen wahrnehmen; man kann sie auch nachahmen, indem man ein Licht durch eine mit Bärlappsamen bestäubte Glastafel betrachtet oder das Spiegelbild eines Lichtes in einer etwas angelaufenen, durch einen Laden verdunkelten Fensterscheibe. Fraunhofer gab die mathematische Erklärung der hierbei vorkommenden Beugungserscheinungen und fand den Zusammenhang zwischen dem Dm. der Nebelbläschen und dem Radius der Hofringe; so ist der Radius des rothen Ringes $r = 0{,}000\,257 : d$, wo d den Durchm. der Nebelbläschen bedeutet. Je kleiner also die Nebelbläschen sind, desto größer wird der Hof, was bei schönerem Wetter stattfindet; kleine Höfe zeigen das Vergrößern der Nebeltheilchen, also schlechtes Wetter an. — Sind die Eisnadeln, welche die großen Höfe erzeugen, sechsseitige Säulen, so bilden immer 2 einander nicht parallele Flächen ein Prisma von 60°, für welches das Minimum der Ablenkung 22° beträgt. Str. aber, welche das Minimum der Ablenkung bei parallelem Auftreffen erfahren, sind auch nach der Brechung parallel, verhalten sich also wie die wirksamen Str. des Regenbogens, wodurch sich die Form und Farbenfolge der Höfe erklärt. Durch solche Str., welche durch eine Seitenfläche und eine Grundfläche der sechsseitigen Säule gehen, also durch ein Prisma von 90° brechenden Winkel, erklärt sich der doppelt so große Ring, weil das Minimum der Ablenkung für ein Eisprisma von 90° nach genauer Beobachtung 46° beträgt. Der horizontale, durch die S. gehende Lichtstreifen von Sonnenbreite erklärt sich durch Reflexion der Sonnenstr. an verticalen Wänden der Eisnadeln, und in ähnlicher Weise sind durch Brechung und Reflexion die übrigen Erscheinungen der großen Höfe zu erklären.

2. Der Druck der Luft.

596 **Abnahme des Luftdrucks nach oben, barometrische Höhenmessung (Pascal 1648).** Der Luftdruck ist auf der Höhe der Meeresfläche, wie das Barometer angibt, durchschnittlich gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 760^{mm} Höhe, oder wie man sich kurz ausdrückt, gleich 760^{mm}. Nach oben wird, wie leicht erklärlich, der Luftdruck kleiner, weil die auf einer höheren Stelle ruhende Luftsäule eine geringere Höhe hat und aus dünnerer Luft besteht. Die Abnahme geschieht nach folgendem Gesetze: Wenn die Höhen in arithmetischer Progression wachsen, so nimmt der Luftdruck in geometrischer Progression ab.

Beweis. Es sei der Barometerstand, der ja bekanntlich den Luftdruck mißt, am Fuße einer h^m hohen Luftsäule b, auf dem Gipfel derselben b', und in 1, 2, 3 .... Meter, also in arithmetischer Reihe steigender Höhe $= b_1, b_2, b_3 \ldots\ldots$, so ist $b - b_1$ die Höhe der Quecksilbersäule, die dasselbe Gewicht hat wie der unterste Meter Luft, ist also ein Maß für die Dichte dieses Luftmeters; ebenso sind $b_1 - b_2$, $b_2 - b_3$, $b_3 - b_4 \ldots\ldots$ die Dichten der folgenden Luftmeter. Da nun nach dem Mariotte'schen Gesetze sich die Dichten wie die Spannungen verhalten und diese gleich den äußeren Drucken, also gleich den Barometerständen b_1, b_2, b_3 u. s. w. sind, so ist $b - b_1 : b_1 - b_2 = b_1 : b_2$, oder nach Vertauschung der Mittelglieder $b - b_1 : b_1 = b_1 - b_2 : b_2$, woraus durch die Summenproportion folgt $b : b_1 = b_1 : b_2$; ebenso ergibt sich $b_1 : b_2 = b_2 : b_3$ und $b_2 : b_3 = b_3 : b_4$, also allgemein $b : b_1 = b_1 : b_2 = b_2 : b_3 = b_3 : b_4 \ldots\ldots$, womit der Satz bewiesen ist.

Damit ein Barometer, das man in die Höhe steigend mit sich führt, um 1^{mm} falle, muß man eine Luftsäule unter sich zurücklassen, die soviel wiegt wie 1^{mm} Queckſ.; nun ist aber die Luft $13{,}59 \cdot 773 =$ ca. 10000 mal leichter als Quecksilber; also wiegt eine Luftsäule von $10000^{mm} = 10^m$ Höhe soviel als 1^{mm} Quecksilber; das Barometer fällt um 1^{mm}, wenn man 10^m in die Höhe steigt, was man ganz gut beobachten kann an einem Aneroid, das man 2 Stiegen hoch trägt; demnach fällt in 100^m Höhe das Barometer um etwa 1^{cm}, und steht in 1^m Höhe auf $759{,}9^{mm}$, wenn es am Fuße der Höhe 760^{mm} zeigt.

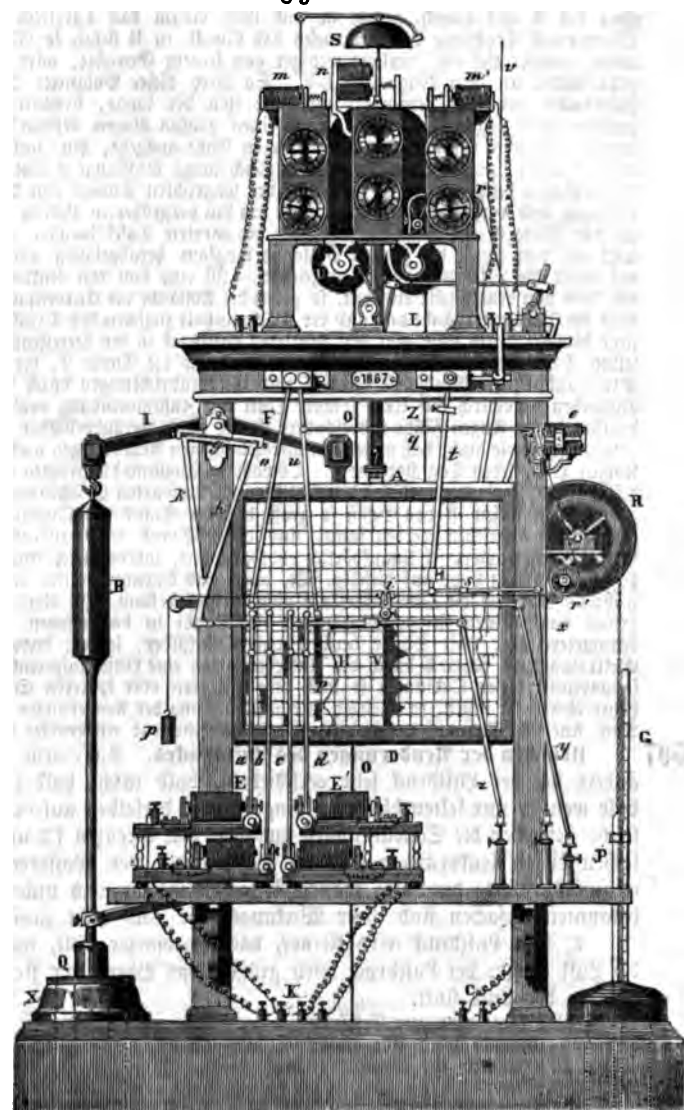


Das Fallen des Barometers bei der Entfernung von der Erdoberfläche dient zum Höhenmessen nach der Fl.

$$h = 18\,400\,(\log b - \log b')\,(1 + 0{,}003665\,t) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (46)$$

Diese Fl. geht aus dem oben bewiesenen Satze hervor; in der geometrischen Progression $b : b_1 = b_1 : b_2 = b_2 : b_3 \ldots$ ist b das 1. Glied, b_1/b der Reihenquotient, während die Gliederanzahl $= h + 1$ ist, da der Barometerstand $b' = b_h$ in der Höhe h stattfindet; also ist nach der Progressionslehre $b' = b\,(b_1/b)^h$, woraus $\log b' = \log b + h\,(\log b_1 - \log b)$, also $h = (\log b' - \log b)/(\log b_1 - \log b)$ oder $h = (\log b - \log b')/(\log b - \log b_1)$. Der Nenner dieses Bruches kann zahlenmäßig dargestellt werden; denn wenn $b = 760$ ist, so ist $b_1 = 759{,}9$ woraus $\log b - \log b_1$ sich als $^1/_{18400}$ ergibt. Durch Einsetzung dieses Werthes ergibt sich $h = 18\,400\,(\log b - \log b')$. Da die Zahlenrechnung für 0° gilt, so ist für eine andere Temp. t noch mit $1 + \alpha t$ zu multipliciren. Eine einmalige barometrische Höhenbestimmung kann sehr ungenau ausfallen, weil der Luftdruck an 2 Orten von gleicher Höhe durch die Wetterverhältnisse stark verschieden sein kann; der Höhenunterschied wird nur dann genau gefunden, wenn von beiden Orten der mittlere Barometerstand bekannt ist, das Mittel aus zahlreichen möglichst lange und gleichmäßig fortgesetzten Beobachtungen. Am genauesten läßt sich dieses Mittel durch ein selbstregistrirendes Barometer finden, das den Barometerstand ununterbrochen oder in kurzen gleichen Pausen selbstthätig auf Papier zeichnet und hierdurch eine getreue Darstellung des Verlaufs der Luftdruckänderungen hervorbringt. Auch für die anderen meteorologischen Elemente, Temperatur, Windrichtung, Windstärke, Regenmenge und -Dauer, absolute und relative Feuchtigkeit sind selbstregistrirende App. construirt worden. Eine Verbindung all

Fig. 385.



dieser App. zu einer Maschine nennt man **Meteorograph**; Wild hat (1861—64) in Bern einen Meteorograph erbauen lassen, P. Secchi in Rom (1862—67); ersterer zeichnet in Pausen von 10 Min., letzterer continuirlich auf; wie ersterer wirkt auch der neuere Meteorograph von Rysselberghe, der seine Linien auf Kupferstechergrund in eine Kupferplatte zieht, so daß dieselben durch Abzug vervielfältigt werden können. Außer diesen Meteorographen gibt es noch zahlreiche selbstregistrirende Instrumente für einzelne Wettergrößen, besonders für den Luftdruck, die man **Barographen** nennt.

Der verbreitetste Barograph beruht auf Morlands **Wagbarometer** (1680); er ist auch in Secchis Meteorograph (Fig. 385) eingeführt. In das gußeiserne, mit Quecksilber gefüllte Gefäß X taucht mit einer großen Holzflansche Q das eiserne Barometerrohr B, das etwa bis B mit Queckſ. gefüllt ist und über diesem das Torricelli'sche Vacuum enthält. Wenn durch Erhöhung des Luftdruckes das Queckſ. in B steigt, so fällt es in X, das Rohr taucht weniger tief ein, verliert weniger von seinem Gewichte, wird dadurch schwerer und zieht stärker an dem Wagbalken LF. So wird dieser Balancier bei Veränderungen des Luftdruckes hin- und hergewiegt und mit ihm der lange, dreiseitige Hebel gkh, dessen unteres Ende wegen der großen Länge einen großen Bogen beschreibt; hierdurch wird die lange, wagrechte Stange, die vom unteren Ende ausgeht, hin- und herbewegt; da deren anderes Ende durch die mit dem Hebel gleich lange Lenkstange z einen gleichen entgegengesetzten Bogen beschreibt, so ist die Mitte der wagrechten Stange von der Kreisbewegung unabhängig und verschiebt sich nur wagrecht um den vergrößerten Betrag der Luftdruckänderung. In der Mitte ist ein Stift befestigt, der die carrirte Tafel berührt, welche durch das Uhrwerk auf dem Kopfe der ganzen Maschine langsam herabgelassen wird, wodurch der Stift auf dieser die Luftdruckcurve H aufzeichnet. Ist eine von den senkrechten Linien ursprünglich 76cm von dem Stifte entfernt, so geben die Abstände der Curvenpunkte von dieser Grundlinie die Barometerstände an, und der Flächeninhalt zwischen der Druckcurve und der Grundlinie dividirt durch diese gibt den mittleren Luftdruck in der betreffenden Zeit an. Auf derselben Tafel sind die Temperaturänderungen durch die Curve T, die Regendauer durch die Strichsäule P, die Windstärke durch V und die Windrichtungen durch die Strichsäulchen W angegeben, wodurch auf einer solchen Tafel der Zusammenhang verschiedener Wettergrößen deutlich in die Augen fällt; insbesondere ist die starke Veränderlichkeit des Luftdruckes wahrzunehmen, sowie auch, daß außer den unregelmäßigen Aenderungen auch regelmäßige Schwankungen z. B. jeden Tag stattfinden. Obwohl in England die größten Wagbarographen ausgeführt sind, so werden doch auf den britischen Wetterwarten Gefäßbarographen in Anwendung gebracht; in diesen ist das Gefäß so groß, daß der Stand des Quecksilbers in der Röhre als entscheidend angesehen werden kann, und dieser Stand wird auf einer durch ein Uhrwerk fortbewegten Papiertafel unaufhörlich photographirt, indem durch einen zur Barometerröhre parallelen Spalt Licht auf dieselbe fällt, durch das Vacuum weiter auf die Papiertafel geht, während es durch die Quecksilbersäule nicht fortgehen kann. In Rysselberghes Meteorograph dringt nach kleinen Zeitzwischenräumen ein Draht in den offenen Schenkel eines Heberbarometers ein; diese Sonde berührt das Quecksilber, schließt dadurch den Strom eines Elektromagnets, wonach durch die Ankerbewegung eine Linie aufgezeichnet wird; da die Anfangspunkte dieser Ordinaten je nach dem früheren oder späteren Eintritte der Berührung höher oder tiefer liegen, so erzeugen sie eine Abbildung der Aenderungen des Barometerstandes. Auch Aneroide sind auf verschiedene Art selbstregistrirend eingerichtet worden.

597 **Ursachen der Aenderungen des Luftdruckes.** An einem und demselben Orte ändert sich der Luftdruck sehr verschieden, bald rasch, bald stark, bald langsam, bald wenig; nur selten bleibt er längere Zeit derselbe; auf der Höhe der Meeresfläche geschehen die Schwankungen zwischen den Grenzen 72 und 80cm. Die Ursachen dieser Aenderungen sind die Temperatur, der Wasserdampfgehalt, die Bewegungszustände der Luft; manche Ursachen mögen noch unbekannt sein, und die bekannten Ursachen sind ihrer Wirkungsweise nach nicht zweifellos festgestellt.

1. Der Luftdruck wird kleiner, das Barometer fällt, wenn die Temperatur der Luft steigt; der Luftdruck wird größer, das Barometer steigt, wenn die Temperatur der Luft sinkt.

Früher sagte man zur Erklärung dieser Erscheinungen kurzweg: die Wärme dehnt die Luft aus, deßhalb wird eine erwärmte Luftsäule höher und fließt daher oben nach allen Seiten ab, wodurch ihr Gewicht geringer wird. Hann hat (1879) die Erklärung gründlicher ausgeführt: Die Erwärmung der Luft geschieht von unten, die unterste Luftschicht wird zuerst erwärmt; nach der Erde hin kann sie sich nicht ausdehnen, nach den Seiten hin auch nicht, weil ihr gewöhnlich ein gleiches Ausdehnungsbestreben entgegen wirkt; folglich kann die Ausdehnung nur nach oben stattfinden; die Luft steigt also auf, es entsteht ein Aufsteigen-

sionsstrom, durch dessen Mithilfe sich die Erwärmung weiter nach oben fortpflanzt, so daß auch höhere Luftschichten sich nach oben ausdehnen und hierdurch den Ascensionsstrom wieder verstärken u. s. w. Hierdurch wird aber der Luftdruck nicht geändert, weil über der Erdfläche noch dieselbe, wenn auch theilweise gestiegene Luftmenge ruht. Ebenso ist auch über einer Anzahl von Lufttheilchen, die vorher eine Fläche gleichen Luftdruckes bildeten, noch dieselbe Luftmenge vorhanden, sie bilden nach dem Steigen noch eine Fläche desselben gleichen Luftdruckes, aber diese Fläche ist gehoben worden und zwar um so mehr, je höher sie liegt, weil die Hebung höherer Luftschichten gleich der Ausdehnung einer hohen Luftsäule ist, die Hebung tieferer Schichten gleich der Ausdehnung einer niedrigen Luftsäule. Diese Folgerungen bestätigen die Beobachtungen des mittleren Luftdruckes in Gebirgen, da dieser im Sommer ein Maximum, im Winter ein Minimum erreicht. In Genf ist im Januar der Luftdruck = 727^{mm} und im Juli auch; auf dem St. Bernhard in 2500^{m} Höhe ist dagegen im Juli der Luftdruck = 569, im Januar aber nur 561^{mm}; noch größer ist der Unterschied auf dem Theodulpaß in 3300^{m} Höhe; er beträgt dort im Juli 512, im Januar aber nur 502^{mm}. Wenn nun die Flächen gleichen Luftdruckes über einem erwärmten Lande gehoben werden, so haben sie eine höhere Lage, als die Flächen desselben Luftdruckes über einem benachbarten kühleren Land oder Meer; der Unterschied ist in der Tiefe fast unmerklich, wächst aber mit der Höhe und erreicht dort einen wirksamen Betrag; folglich muß in der Höhe die Luft von der erwärmten Gegend in die nicht erwärmte abfließen, wodurch der Luftdruck in der erwärmten Gegend ab, in der kühleren zunimmt; so ist am Aeq. der mittlere Luftdruck 760, in 30° Br. jedoch 765. Umgekehrt hat die Abkühlung das Sinken der Flächen gleichen Luftdruckes, das Zufließen von Luft und das Steigen des Luftdruckes zur Folge.

2. Der Luftdruck wird kleiner, das Barometer fällt, wenn die Luft feucht ist; der Luftdruck wird größer, das Barometer steigt, wenn die Luft trocken ist. Bei dem feuchten Südwestwinde steht das Barometer tief, bei dem trockenen Nordostwinde hoch, selbst im Sommer, wo die hohe Temperatur dem Steigen entgegen ist, noch mehr aber im Winter, wo Trockenheit und Kälte zusammen auf das Steigen wirken.

Mohn (Grundzüge der Meteorologie) sagt: „Da die Wasserdämpfe leichter sind als trockene Luft, wird feuchte Luft in freier Atmosphäre um so geringeren Luftdruck hervorbringen, je mehr sie mit Wasserdampf gesättigt ist.“ Allerdings ist die Dichte des Wasserdampfes nur $^{5}/_{8}$, d. h. 1 Vol. Wasserdampf wiegt $^{5}/_{8}$ des gleichen Vol. Luft, vorausgesetzt daß beide gleiche Temp. und Spannung haben; da nun die Spannung des Wasserdampfes bei den in der Atm. gewöhnlichen Temp. viel geringer ist als 1^{at}, z. B. bei 10° nur = 9^{mm}, so ist selbst der gesättigte Wasserdampf bei diesen Temp. viel leichter als Luft; so gibt Geikie in seiner „Physikalischen Geographie“ an: Während 10^{l} Luft bei 10° 12,4704^{g} wiegen, hat dasselbe Vol. Wasserdampf bei dieser Temp. nur ein Gewicht von 0,0922^{g}, ist also 135mal leichter als die Luft; bei höheren Temp. ist zwar der Unterschied weit geringer, aber bei den in der Atm. gewöhnlichen Temp. ist das Gewicht und der Druck des Wasserdampfes ungleich kleiner als die der Luft. Wenn sich nun in der freien Atm. Luft und Wasserdampf in ähnlicher Weise mengen wie z. B. Wasser und Weingeist, so muß, wie dieses Gemenge leichter ist als Wasser, auch das Gemenge von Luft und Wasserdampf leichter sein als Luft. So sind nach Geikie 10^{l} eiskalte feuchte Luft 0,0286^{g} leichter als eiskalte trockene Luft, 10^{l} wasserdampfgesättigte Luft von 10° um 0,0562^{g} leichter als trockene Luft von derselben Temp., und 10^{l} feuchte Luft von 27° um 0,1462^{g} leichter als dasselbe Vol. trockener Luft; also macht die Beimengung von Wasserdampf die Luft leichter, verringert ihren Druck, und zwar um so mehr, je wärmer die Luft ist. Hiermit ist leicht verständlich, warum bei feuchtwarmen Südwestwinden die niedrigsten Barometerstände bis zu 720 herab herrschen, bei trockenkalten Nordostwinden aber die höchsten bis zu 790 und mehr.

Früher hatte man über den Einfluß des Wasserdampfes der Luft eine ganz andere, vielfach noch jetzt für richtig gehaltene Anschauung; man dehnte nämlich das Dalton'sche Gesetz (413.) auch auf die freie Atm. aus. Die Spannung eines Gemisches von Gasen und Dämpfen ist in einem geschlossenen Raume gleich der Summe der Spannungen der Gemengtheile; läßt man dieses Gesetz auch für die freie Atm. gelten, so muß man schließen, daß die Beimischung von Wasserdampf in die atm. Luft den Luftdruck erhöhe und zwar um die Spannung des Wasserdampfes. Man bestimmte bisher z. B. den Druck der trockenen Luft, indem man den durch das Hygrometer gefundenen Dunstdruck von dem Barometerstande subtrahirte; dabei machte man stillschweigend die jedenfalls irrthümliche Voraussetzung, daß die hygrometrische Wasserdampfspannung durch die ganze über dem Orte befindliche Luftsäule vorhanden sei, während sie doch nur für den Ort der Bestimmung gilt, in einiger Entf. schon ganz verschieden sein kann und jedenfalls in der Höhe nicht mehr vorhanden ist; denn der Wasserdampfgehalt der Luft nimmt mit der Höhe bedeutend ab, so daß schon die Hälfte alles Wasserdampfes sich in den ersten 2000^{m} der Lufthöhe befindet und über 6500^{m} nur

noch ein Zehntel desselben vorhanden ist. Wenn demnach jene Berechnung des Druckes der trockenen Luft wohl allgemein als unrichtig zugestanden sein wird, so ist doch nicht allgemein anerkannt, daß die Zumischung von Wasserdampf in allen Fällen den Luftdruck erniedrigt. Nach Mohn scheint dies nur dann der Fall zu sein, wenn der Wasserdampf die Atm. so weit als nur möglich durchdrungen, einen großen Theil der Luft verdrängt und ihre Stelle eingenommen hat. Ebenso scheint auch die Beseitigung des Wasserdampfes nur dann den Luftdruck zu erhöhen, wenn soviel Zeit verflossen ist, daß der Raum des Wasserdampfes wieder ganz durch Luft ersetzt ist. Wenn dagegen der Wasserdampf sich eben erst entwickelt, so kann er größere Luftmengen nicht verdrängen, seine Mol. lagern sich zwischen den Luftmol., wodurch er im Gegensatze zum zweiten Gesetze den Luftdruck erhöht; und umgekehrt, im Augenblicke oder kurze Zeit nach der Condensation, wo der ausgeschiedene Wasserdampf noch nicht durch Luft ersetzt ist, hat die Condensation durch die plötzliche Beseitigung der Wasserdampfspannung, sowie auch durch das Freiwerden der Dampfwärme eine Verminderung des des Luftdruckes zur Folge. So sagt Mohn speciell:

3. Der Luftdruck wird kleiner, das Barometer fällt, wenn die Wasserdämpfe zu Wolken oder Niederschlag verdichtet werden. Diese Condensation vermehrt die Luftwärme in der Wolkenschicht und damit die Kraft des aufsteigenden Luftstromes. Wenn der Niederschlag ausgeschieden und zur Erde herabgefallen, ist der ganze Druck, welchen er in Dampfform als Bestandtheil der Atm. ausgeübt hatte, entfernt. Somit wird der Niederschlag eine sehr einflußreiche, ja vielleicht die allereinflußreichste Ursache zum Fallen des Barometers abgeben.

Mohn führt unter der Verminderung des Luftdruckes noch den Ascensionsstrom an; wir haben den letzteren schon in 1. erwähnt, jedoch muß zugefügt werden, daß derselbe auch seine luftdruckvermindernde Wirkung haben muß, wenn er nicht durch Wärme oder Dampfbildung entsteht. Umgekehrt hat ein absteigender Luftstrom die Wirkung, den Luftdruck zu vergrößern, da hinter ihm ein Zufluß von Luft stattfindet. Jede Bewegung der Luft bringt ebenfalls eine Verminderung des Luftdruckes hervor, wie fließendes Wasser einen geringeren Druck ausübt als ruhendes; man darf jedoch diesen Luftdruck auf das Barometer nicht mit dem Winddruck verwechseln; dieser steigt mit der Geschw. der Luftmasse, jener nimmt bei zunehmender Geschw. ab, was wohl zu dem ungewöhnlich niedrigen Luftdruck bei Stürmen beiträgt. Nachdem wir nun die Ursachen der Luftdruckänderungen, soweit die Wissenschaft sie erforscht hat, kennen gelernt haben, betrachten wir die Aenderungen selbst.

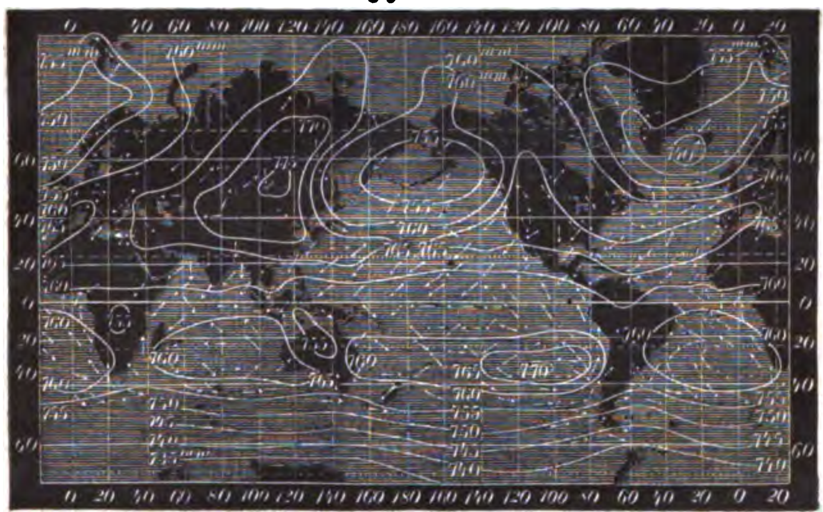
598 **Aenderungen des Luftdruckes an einem Orte.** Man unterscheidet regelmäßige und unregelmäßige Luftdruckänderungen; die regelmäßigen sind die täglichen und die jährlichen. Die tägliche Periode des Luftdruckes besteht darin, daß das Barometer ungefähr um 4 Uhr Morgens und Nachmittags ein Maximum, dagegen um 10 Uhr Morgens und Abends ein Minimum anzeigt.

An Tagen ohne unregelmäßige Luftdruckänderung zeichnet das selbstregistrirende Barometer die tägliche Schwankung als eine 2mal auf- und absteigende Curve auf. Die tägliche Aenderung ist am Aeq. am größten, etwa 3mm, nimmt nach den Polen hin ab, beträgt bei uns etwa 1/2mm und wird in den polaren Gegenden unmerklich. Das Minimum und Max. sind am Tage mehr verschieden als in der Nacht. Dove erklärte die tägliche Aenderung durch Zusammenwirken der Temp. und des Wasserdampfgehaltes der Luft, woran auch Mohn sich anschließt. Am Morgen ruft die steigende Temp. den Ascensionsstrom hervor, in Folge dessen der Luftdruck sinkt; aber zur selben Zeit geht auch die Verdampfung vor sich und zwar rascher als das Aufsteigen der Luft, so daß das Barometer durch den rasch zunehmenden Dunstdruck steigt. Mittlerweile ist der aufsteigende Strom in rascheren Fluß gekommen, da er durch den verdrängend wirkenden Wasserdampf verstärkt wird, das Barometer fängt um 9—10 Uhr an zu fallen. Nachmittags dauert diese Wirkung noch fort, bis die Erwärmung abgenommen hat, der aufsteigende Strom schwächer wird und das Verdrängen von Luft durch Wasserdampf aufhört, das Barometer fällt etwa um 4 Uhr nicht mehr. Wenn die Erde sich am Abend abkühlt, sinkt die Luft, der absteigende Strom bewirkt das Steigen des Barometers bis 10 Uhr Abends, wo durch den Einfluß der Condensation ein schwächeres und langsameres Fallen als am Tage eintritt. Gegen Morgen ist der Wasserdampf allmälig durch Luft ersetzt worden, die Abkühlung ist am stärksten, es tritt etwa um 4 Uhr Morgens wieder Steigen ein. Weil der tägliche Wärmeunterschied am Aeq. am größten ist, so ist dort auch die tägliche Aenderung des Luftdruckes am stärksten. Viele jetzigen Meteorologen verwerfen diese Erklärung ganz und gar und halten die tägliche Periode für unerklärt.

Die jährliche Aenderung des Luftdruckes ist an verschiedenen Orten sehr

Continenten ist es umgekehrt; z. B. das kleine Neuholland hat im Juli 770 und im Jan. 755. Allgemein haben die Continente im Winter bleibende Maxima und im Sommer bleibende Minima. Dies ist einfach daraus erklärlich, daß im Winter über den Continenten trockene Kälte und im Sommer weniger trockene Hitze herrscht, was näher beim Land- und Seeklima zu betrachten ist. Auf den großen Weltmeeren nimmt von der hohen Luftdruckzone 765 an, im Winter wie im Sommer, der Luftdruck nach den polaren Gegenden hin ab, was man wenigstens für die nördliche Erdhälfte durch die wandernden Minima erklärt, die mehr dem Meere als dem Lande angehören und daher dort ihren erniedrigenden Einfluß vorwiegend geltend machen; entsprechend ist die Abnahme im Winter stärker als im Sommer, da die wandernden Minima im Winter häufiger sind als im Sommer; so ist es denn erklärlich, daß Island und Kamschatka im Jan. ein Minimum und im Juli ein Max. zeigen. Diese durchschnittlichen oder bleibenden Minima, die in den Isobarenkarten des mittleren

Fig. 387.



Luftdruckes auftreten, sind nicht mit den wandernden Minimen zu verwechseln, die in den Tagesisobaren häufig erscheinen; es ist deßhalb geeignet, die letzteren mit dem Namen Depressionen zu bezeichnen, der in den Berichten der Wetterwarten oder meteorologischen Stationen immer häufiger vorkommt. In den Tageskarten treten auch Maxima auf; jedoch bleibt ein Maximum gewöhnlich längere Zeit in derselben Gegend und breitet sich höchstens weiter aus; so dauert das sibirische Maximum fast den ganzen Winter. Im Winteranfang entsteht durch die lange Ausstrahlung in den langen Winternächten, der nur eine schiefe und schwache Einstrahlung in den kurzen Tagen entgegenwirkt, eine sehr niedrige Temp., sehr kalte Luft und daher ein hoher Luftdruck; deßhalb fließt die Luft nach allen oder vielen Seiten ab. In Folge dessen muß aus der kalten Höhe die noch kältere Luft herabsinken; dieser absteigende Strom, der aus kalter Luft besteht, erhält den hohen Luftdruck, das Abfließen nach allen Seiten und dadurch wieder das Herabsinken. Aber auch im Sommer erhält sich das Max. lange; denn auch hier fließt die Luft unten ab und verursacht einen absteigenden Luftstrom; die aus der Höhe kommende Luft ist schon trocken, wird durch das Herabsinken etwas verdichtet, erwärmt und dadurch noch trockener und schwerer. Wegen ihrer Trockenheit bewirkt sie in allen Fällen einen heiteren Himmel, daher im Winter starke Ausstrahlung, große Kälte, im Sommer starke Einstrahlung, hohe Wärme. Die Maxima sind also die Quellen constant schönen Wetters.

Eine Depression hält gewöhnlich nicht lange in einer Gegend an, sie verschwindet in dieser Gegend und taucht in einer benachbarten auf, wo sie dann auch bald verschwindet u. s. w., kurz sie wandert oft in wenigen Tagen durch Weltmeere und Welttheile.

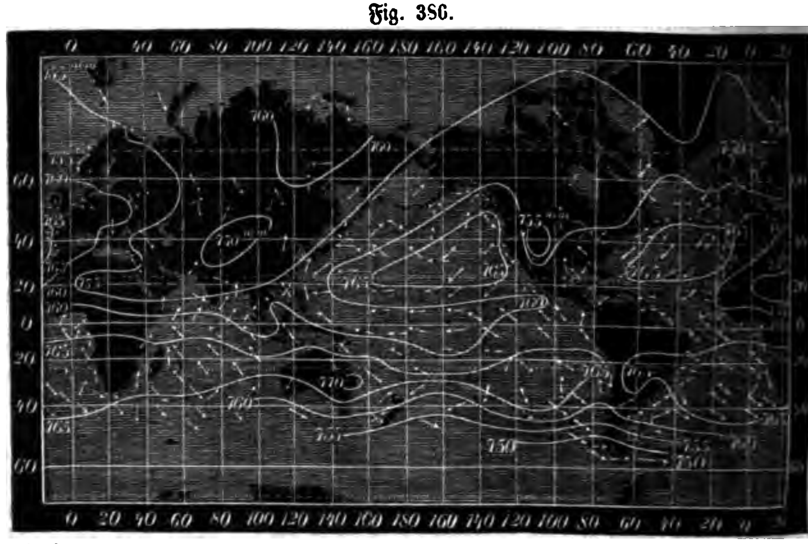
Fig. 388 stellt das Minimum des Sturmes am 18. Nov. 1864 dar. Die weißen ausgezogenen Linien sind die concentrischen Isobaren der Depression; aus denselben sieht man, daß im innersten Theile des Minimums der Luftdruck fast auf 72cm gesunken war,

wachsender Anzahl jene Gegenden durchwandern und in etwa 60° am zahlreichsten sind. Die dann folgende Zunahme ist der Kälte und Dampfarmuth der polaren Gegenden zuzuschreiben. Um die Vergleichungen in allen drei Fällen zu erleichtern, wurde die graphische Darstellung der Barometerstände durch die Isobaren eingeführt.

Isobaren sind auf Landkarten gezogene Linien, welche Orte gleichen Luftdruckes verbinden. Buchan hat Isobarenkarten des mittleren Luftdruckes überhaupt und des mittleren Luftdruckes für die einzelnen Monate herausgegeben, und die meteorologischen Centralstationen, wie z. B. die deutsche Seewarte in Hamburg, geben jeden Tag Isobarenkarten über den Luftdruck Morgens um 7 oder 8 Uhr für die benachbarten Länder und Meere heraus, die in Nordamerika sogar in den Zeitungen abgedruckt und an öffentlichen Plätzen angeschlagen werden, weil der Kundige aus denselben ein Urtheil über den Wetterlauf in nahen und fernen Gegenden für die nächsten Tage ziehen kann. Von besonderer Bedeutung auf diesen Karten wie überhaupt in der neueren Meteorologie sind die Maxima und Minima des Luftdruckes, die in den Isobarenkarten durch geschlossene concentrische Curven angegeben sind, welche nach außen abnehmende Luftdruckzahlen tragen bei einem Maximum und zunehmende bei einem Minimum. Ein Maximum ist ein solcher Luftdruck, der nach allen Richtungen abnimmt, und ein Minimum ist die niedrigste Stelle einer Depression, eines weit verbreiteten niedrigen Luftdruckes. Die Maxima sind die Quellen des beständigen Wetters, die Minima die Quellen des veränderlichen Wetters. Wie die täglichen Isobarenkarten ein Urtheil über das Wetter des Tages ermöglichen, so geben die Isobarenkarten des mittleren monatlichen Luftdruckes ein Abbild des jährlichen Wind- und Wettercharakters der Orte.

Fig. 386 und 387 sind Buchans Isobarenkarten für den mittleren Luftdruck in den Monaten Juli und Januar. Aus denselben sind zunächst die obigen Angaben über den mittleren Luftdruck überhaupt ebenfalls zu ersehen, wenn man aus den 2 Angaben für eine Gegend den Durchschnitt nimmt. Außerdem ersieht man über den jährlichen Luftdruck-

Fig. 386.



verlauf mancherlei von Bedeutung: In der äq. Gegend herrscht im Januar und Juli derselbe Luftdruck von 760, was mit dem constanten Wettercharakter jener Gegend stimmt. In Innerasien ist im Jan. ein bleibendes Max. von mehr als 775, im Juli ein bleibendes Min. von weniger als 750; ähnlich ist es auf anderen nördl. Continenten. Auf südlichen

Continenten ist es umgekehrt; z. B. das kleine Neuholland hat im Juli 770 und im Jan. 755. Allgemein haben die Continente im Winter bleibende Maxima und im Sommer bleibende Minima. Dies ist einfach daraus erklärlich, daß im Winter über den Continenten trockene Kälte und im Sommer weniger trockene Hitze herrscht, was näher beim Land- und Seeklima zu betrachten ist. Auf den großen Weltmeeren nimmt von der hohen Luftdruckzone 765 an, im Winter wie im Sommer, der Luftdruck nach den polaren Gegenden hin ab, was man wenigstens für die nördliche Erdhälfte durch die wandernden Minima erklärt, die mehr dem Meere als dem Lande angehören und daher dort ihren erniedrigenden Einfluß vorwiegend geltend machen; entsprechend ist die Abnahme im Winter stärker als im Sommer, da die wandernden Minima im Winter häufiger sind als im Sommer; so ist es denn erklärlich, daß Island und Kamschatka im Jan. ein Minimum und im Juli ein Max. zeigen. Diese durchschnittlichen oder bleibenden Minima, die in den Isobarenkarten des mittleren

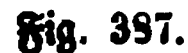
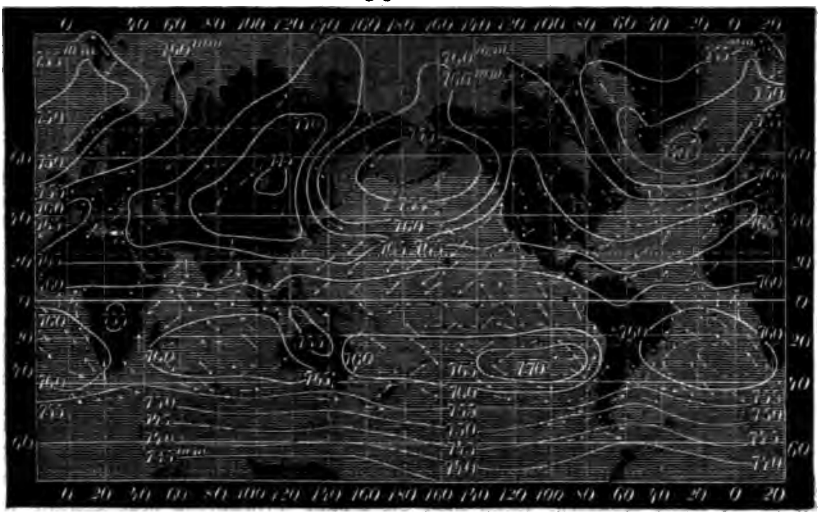


Fig. 387.



Luftdruckes auftreten, sind nicht mit den wandernden Minimen zu verwechseln, die in den Tagesisobaren häufig erscheinen; es ist deßhalb geeignet, die letzteren mit dem Namen Depressionen zu bezeichnen, der in den Berichten der Wetterwarten oder meteorologischen Stationen immer häufiger vorkommt. In den Tageskarten treten auch Maxima auf; jedoch bleibt ein Maximum gewöhnlich längere Zeit in derselben Gegend und breitet sich höchstens weiter aus; so dauert das sibirische Maximum fast den ganzen Winter. Im Winteranfang entsteht durch die lange Ausstrahlung in den langen Winternächten, der nur eine schiefe und schwache Einstrahlung in den kurzen Tagen entgegenwirkt, eine sehr niedrige Temp., sehr kalte Luft und daher ein hoher Luftdruck; deßhalb fließt die Luft nach allen oder vielen Seiten ab. In Folge dessen muß aus der kalten Höhe die noch kältere Luft herabsinken; dieser absteigende Strom, der aus kalter Luft besteht, erhält den hohen Luftdruck, das Abfließen nach allen Seiten und dadurch wieder das Herabsinken. Aber auch im Sommer erhält sich das Max. lange; denn auch hier fließt die Luft unten ab und verursacht einen absteigenden Luftstrom; die aus der Höhe kommende Luft ist schon trocken, wird durch das Herabsinken etwas verdichtet, erwärmt und dadurch noch trockener und schwerer. Wegen ihrer Trockenheit bewirkt sie in allen Fällen einen heiteren Himmel, daher im Winter starke Ausstrahlung, große Kälte, im Sommer starke Einstrahlung, hohe Wärme. Die Maxima sind also die Quellen constant schönen Wetters.

Eine Depression hält gewöhnlich nicht lange in einer Gegend an, sie verschwindet in dieser Gegend und taucht in einer benachbarten auf, wo sie dann auch bald verschwindet u. s. w., kurz sie wandert oft in wenigen Tagen durch Weltmeere und Welttheile.

Fig. 388 stellt das Minimum des Sturmes am 18. Nov. 1864 dar. Die weißen ausgezogenen Linien sind die concentrischen Isobaren der Depression; aus denselben sieht man, daß im innersten Theile des Minimums der Luftdruck fast auf 72^{cm} gesunken war,

eine tiefe Depression, nach außen stark zunahm und bis über 76cm stieg. Die punktirte Linie ist die Zugstraße des Minimums, der Weg, welchen die Stelle des niedrigsten Luftdruckes in wenigen Stunden zurücklegte. Die europäischen Depressionen werden gewöhnlich westlich von Irland zuerst beobachtet, wandern über Irland, England, Nordsee, Dänemark, Schweden, Ostsee, Rußland; hierbei werden die Luftdruckunterschiede gewöhnlich geringer, der niedrigste Luftdruck im Inneren steigt nach und nach, die Depression wird flach, die concentrischen Isobaren rücken weiter auseinander, das Minimum verschwindet gewöhnlich im Innern des Continents. Die Depressionen treten gewöhnlich zusammen mit Stürmen auf, ja man hält sie für die Ursachen derselben; deßhalb werden sie mit den Stürmen zusammen betrachtet; jedoch bestimmen sie auch großentheils das Wetter von Westeuropa und Nordamerika, bringen die Drehung der Winde hervor u. s. w., weßhalb die Erforschung der Minima die Hauptaufgabe der heutigen Meteorologie ist, deren Lösung indeß noch nicht erreicht ist.

Fig. 388.

3. Die Wärme der Luft.

600 **Entstehung der Luftwärme.** Wenn auch die Temp. des Weltraumes nicht den absoluten Nullpunkt (—273° C) erreicht, so ist sie doch sehr niedrig, wohl weit unter — 100°. Die innere Erdwärme mag an sich sehr hoch sein; doch ist ihr Sitz zu weit von der Erdoberfläche entfernt und die Erdschichten sind zu wenig gute Leiter, um der Oberfläche Wärme zuführen zu können; die Erdoberfläche würde daher durch Ausstrahlung in den kalten Weltraum bald alle Wärme verlieren und in tiefster Kälte erstarren, wenn nicht die Sonne fortwährend neue Wärme zustrahlen würde. Die Quelle der Luftwärme ist also die Sonne; jedoch wird die Luft nicht direct von den auftreffenden Sonnenstrahlen erwärmt, indem die Luft wärmedurchlassend oder diatherman ist und nur etwa 1/4 jener Sonnenstrahlen absorbirt; den größten Theil ihrer Wärme erhält die Luft von der durch die Sonne erwärmten Erdoberfläche, theils durch die Berührung derselben, theils dadurch, daß die von dem Boden absorbirten Sonnenstrahlen in dunkle Wärme umgewandelt, als dunkle Wärmestrahlen emittirt und so leichter von der Luft absorbirt werden. Weil die Erwärmung der Luft durch den Boden geschieht, so nimmt die Temp. der Luft nach oben ab.

Längere Zeit herrschte die Meinung, daß die Luft von den directen Sonnenstrahlen nur sehr wenig oder nicht erwärmt werde, weil die elementaren Gase O, N, H für die Sonnenstrahlen durchlässig, diatherman sind. Violle stellte jedoch (1875) Messungen vom Gipfel des Montblanc nach der franz. Ebene hin an und fand, daß von der gesammten Sonnenstrahlung 94% bis in die Höhe von 5000m, 89% bis in 3000m, 79% bis in 1200m und 71% bis in 200m Höhe herabgelangen, daß also die unteren Schichten der Atm. etwa 1/4 der Sonnenstrahlen absorbiren. Es ist dies leicht erklärlich, wenn man zugibt, daß der Wasserdampf nach Tyndall oder Wasserdampf und Kohlendioxyd nach Röntgen (443.) eine starke Absorption und zwar vorwiegend auf die dunkeln Strahlen ausüben. In bedeutender Höhe ist die Luft sehr trocken und arm an CO_2; deßhalb ist dort die Absorption sehr gering; in der Tiefe aber ist die Luft feucht und reicher an CO_2, weßhalb hier die Absorption jenes Viertels hauptsächlich stattfindet. Auf hohen Bergen kann daher die Sonne unerträglich heiß scheinen, während die Luft kühl bleibt; so stieg auf dem Himalaya in 3000m Höhe Hookers Therm. im Sonnenschein auf 45°, während die Temp. des beschatteten Schnees in der Nähe nur 5° betrug; auch ist in den Tropen die Hitze nicht so

unerträglich, weil die Sonnenstrahlung durch den reichlichen Wasserdampf stark absorbirt wird. In den trockenen polaren Gegenden vermag der Sonnenschein den Schiffstheer zu schmelzen, während die Luft eisig kalt bleibt.

Daß die übrigen $^3/_4$ der Sonnenstrahlung von dem Boden aufgenommen und durch diesen hauptsächlich die Erwärmung der Luft vollbracht wird, ergibt sich aus mancherlei Gründen: die mittlere Temp. der Oberfläche des Bodens ist ein wenig höher als die mittl. Temp. der Luft; die Temp. der Luft ändert sich mit der Bodenbeschaffenheit, ist über dem heißen Wüstenboden der Sahara am höchsten, wo in Murzuk die höchste Hitze im Freien (55°) beobachtet wurde, aber viel niedriger über dem langsam sich erwärmenden Meere selbst am Aeq.; Tyndall stand auf dem Plateau des Montblanc bis an die Hüften im Schnee, der trotz heißer Sonnengluth nicht schmolz, weil er nur geringe Absorption besitzt. Wenn nun der Boden auch die Luft erwärmt, so bringt doch die Sonnenwärme nicht tief ein; in 1^m Tiefe ist schon der Unterschied zwischen Tag- und Nachttemp. verschwunden und in 25^m Tiefe der Unterschied der Jahreszeiten; hier herrscht immer die mittlere Temperatur des Ortes, und von hier an steigt die Temp. des Bodens für je 33^m Tiefe um 1°. In einem 25^m tiefen Keller der Pariser Sternwarte steht schon seit 60 J. ein Therm. immer auf 11,8°, der dortigen Mitteltemp.; in Sibirien in 50° Br. ist die Mitteltemp. unter 0°, dort ist der Boden in 3 bis 20^m Tiefe immer gefroren; in den Tropen, wo der jährliche Temperaturwechsel gering ist, liegt die Schicht der constanten Temp. schon in 6^m Tiefe. Wie die Sonnenwärme nicht tief eindringt, so bringt sie auch nur langsam ein. Bei einer Messung war in London im Juli die höchste Wärme der Bodenoberfläche 21°, die höchste der Luft 17°, die höchste in 2^m Tiefe 15° im Aug., die höchste in 4^m Tiefe 13° im Sept., die höchste in 8^m T. 11° Ende Nov.; die niedrigste in dieser Tiefe war nur 9° und fand im Juni statt. In sehr tiefen Kellern ist es also im Sommer wirklich (und nicht blos scheinbar) kälter als im Winter, jedoch ist der Unterschied gering. Wasser, das in wenig tiefen Wasserleitungen fließt, ist im Sommer warm und im Winter kalt; kommen Quellen aus 10^m Tiefe, so ist ihr Wasser im Sommer etwas kühler als im Winter; Quellen aus $20-30^m$ Tiefe behalten ihre Temp., die der mittleren des Ortes gleich kommt; Quellen aus größerer Tiefe liefern Wasser von höherer Temp.

Daß die vom Boden absorbirten Sonnenstrahlen in dunkle Wärme verwandelt werden, ist selbstverständlich, da der Boden nur dunkle Wärme ausstrahlt; dieselbe wird wohl auch durch Mittheilung und Strömung der Luft übertragen, aber gewiß auch großentheils von Wasserdampf und Kohlensäure absorbirt; denn in der trockenen Luft der Wüste Sahara sinkt in der Nacht die Temp. zu empfindlicher Kühle herab. Umgekehrt steigt die Temp. bedeutend, wenn ein Schirm angebracht wird, der die dunkeln Wärmestrahlen nicht durchläßt, so in einem Zimmer, auf dessen Glasfenster die Sonne scheint, in den Mistbeeten und Gewächshäusern, deren Glaswände die hellen Sonnenstrahlen ein-, aber die dunkle Wärme nicht wieder hinauslassen; hat man ja in einem dunkeln, in Watte gebetteten und mit mehreren Spiegelglastafeln bedeckten Kasten Wasser in einem kleinen Gefäße durch die Sonnenstrahlen zum Sieden gebracht.

Die Abnahme der Lufttemp. bei zunehmender Höhe erklärt sich einfach: die Luft wird nach oben immer ärmer an Wasserdampf und Kohlensäure, kann also weder von der Wärme, die die Sonne einstrahlt, noch von der Wärme, die die Erde ausstrahlt, ein erhebliches Maß absorbiren, von der letzteren um so weniger, da dieselbe schon großentheils in den tieferen Schichten absorbirt wird. Und die warme Luft, die durch ihre Erwärmung aufsteigt, dehnt sich nach oben immer mehr aus, kühlt sich also ab. In den Gebirgen geschieht die Abnahme ziemlich gleichmäßig mit der Zunahme der Höhe und zwar für 100^m um 0,6°. Die Ballonfahrten Glaishers (1862—66) ergaben, daß im Freien die Temp. anfangs stärker abnimmt als in Gebirgen, in bedeutenden Höhen aber langsamer, anfänglich für 100^m Höhe um 0,9°, in 8000^m Höhe dagegen für 100^m nur um 0,2°; demnach ist im Freien schon in 2000^m Höhe die Temp. meist unter dem Eispunkt; aber auch in Gebirgen liegt selbst am Aeq. die Schneegrenze nur 5000^m hoch, so daß in dem tropischen Amerika vom Fuße bis zum Gipfel der Cordilleren alle Klimate, vom tropischen bis zum polaren vorhanden sind und in kurzer Zeit durchwandert werden können.

Beobachtung der Luftwärme. Die Beobachtung der Lufttemp. am Therm. muß im Freien im Schatten stattfinden, weil sonst eine Vergleichung mit nicht sonnigen Tagen unmöglich wäre. Das Therm. muß eine solche Aufstellung in einem Gehäuse erhalten, daß es gegen Regen und dessen Verdunstungskälte, gegen Zustrahlung durch wärmere und gegen Ausstrahlung durch kältere Gegenstände geschützt ist. Für die Berechnung der mittleren Temp. ist das selbstregistrirende Therm., der Thermograph am geeignetsten; es gibt Thermographen, die auf der Ausdehnung eines Drahtes oder Stabes beruhen, Quecksilberthermographen, deren 601

Stand auf einer bewegten Papiertafel photographirt oder durch Eintauchen einer Sonde notirt wird, und Luftthermographen, die der höchsten Genauigkeit durch Verbindung mit dem Princip des Wagbarographen fähig werden. Auch wird das Maximum- und Minimumtherm. für die mittleren Temp. benutzt, wobei das Six'sche Therm. in letzter Zeit besonders empfohlen wird.

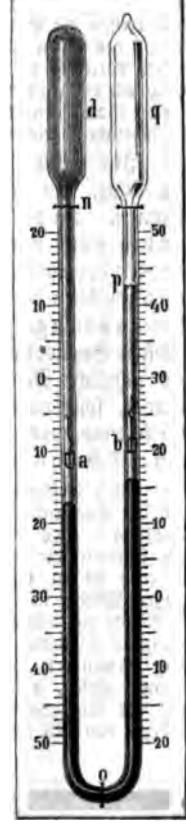
Die Wirkung der directen Sonnenstrahlen auf ein Therm. hängt von vielen Umständen ab, von der chemischen, phys. und zufälligen äußeren Beschaffenheit des Glases, von der Menge des Quecks. u. s. w., so daß zwei sonst ganz gleich gehende, aber etwas verschieden gebaute Therm. im Sonnenscheine einen ganz verschiedenen Stand zeigen; auch hierdurch ist die Nothwendigkeit der Beobachtung im Schatten angezeigt. Die Schutzgehäuse sind leider verschieden und genügen alle nicht vollkommen; wenn sie nur wenigstens überall gleich wären, wie in England, wo der Stevenson'sche Ständer bei allen officiellen Therm. in Anwendung ist. Befestigt man ein Therm. an einer Meterstange und schwingt dieses Schleuderthermometer mehrmals in der Luft herum, so nimmt es die richtige Schattentemp. an. — In Secchis Meteorograph (Fig. 385) ist ein im Freien ausgespannter Kupferdraht von 17^m Länge als thermometrische Substanz verwendet (nach Kreil 1849); wird derselbe durch Abkühlung verkürzt, so zieht er an einem federnden Winkelhebel und übt so mittels des Drahtes v (in der Fig. ganz oben) einen Zug auf einen zweiten Winkelhebel, der den Hebel t nach rechts zieht; das untere Ende desselben beschreibt einen Kreisbogen; da an diesem Ende die wagrechte Stange s befestigt ist, deren anderes Ende mittels des Hebels x einen entgegengesetzten Bogen beschreibt, so hat die Mitte der Stange s eine wagrecht hin- und hergehende Bewegung, die durch einen Stift auf der herabgehenden Coordinatentafel die Temperaturcurve T aufzeichnet. Einer großen Genauigkeit scheint Schreibers (1879) Thermograph (Fig. 389) fähig zu sein, da in demselben das Luftherm. mit dem Wagbarograph verbunden ist. A ist ein möglichst großes, im Freien aufgestelltes Luftthermometergefäß, das durch die capillare Röhre B mit dem Wagbarograph CDE communicirt, und zwar direct mit der oben offenen Röhre C, die von der Glocke E umschlossen ist, während diese in das Quecksilber des Gefäßes D eintaucht und an der einen Seite des Balanciers F aufgehängt und durch ein Gegengewicht G balancirt ist, das mit dem Stifte H die Temperaturcurve T auf den Cylinder J zeichnet. Wenn die äußere Temp. steigt, so wird die Luft in A ausgedehnt, also ein Theil derselben durch B und C in die Glocke E getrieben; folglich muß aus der Glocke ein wenig Quecksilber treten, wodurch dieselbe leichter wird und steigt, wonach das Gegengewicht sinkt und durch seinen Stift das Sinken notirt. Bei der Abnahme der Temp. sinkt die Glocke und das Gegengewicht steigt. Die Dimensionen können so gewählt werden, daß der Stift für 1° C. eine Bewegung von 5^{mm} ausführt. — Das Thermometer von Six (1794) (Fig. 390) ist nicht nur ein Max.- und Min.-Therm., sondern zeigt auch den gewöhnlichen Stand der Temp. doppelt an, corrigirt sich also selbst; da es jetzt billiger angefertigt wird, dringt es mehr in den gewöhnlichen Gebrauch ein. Es besteht aus einer Glasröhre nop mit 2 Schenkeln, die beide in Gefäße d und q übergehen; der unten umgebogene Theil enthält Quecks. der rechte Schenkel Weingeist bis p, während der linke Schenkel und sein Gefäß

Fig. 389.



ganz mit Weingeist ausgefüllt sind und das rechte Gefäß luftleer ist. Die beiden Weingeistsäulen enthalten die Stahlstifte a und b, die sich leicht am Glase reiben und zur Verstärkung der Reibung mit federnden Glasschwänzchen versehen sind. Bei steigender Temp. steigt das Quecks. rechts, schiebt den Stift b hinauf und läßt ihn beim Fallen dort liegen, so daß er das Max. angibt; bei sinkender Temp. steigt das Quecks. links, schiebt den Stift a hinauf und läßt ihn beim Fallen dort liegen, so daß er das Min. angibt. Die Rückführung der Stifte an das Quecks. geschieht durch einen kleinen Magnet.

Fig. 390.



602 **Die mittleren Temperaturen; die tägliche und jährliche Periode der Lufttemperatur.** Die mittlere Temp. eines bestimmten Tages wird erhalten, indem man möglichst viele Beobachtungsresultate addirt und die Summe durch ihre Anzahl dividirt. Die Normaltemperatur eines Tages wird erhalten, indem man die mittlere Temp. dieses Tages in möglichst vielen Jahren addirt und ihre Summe durch ihre Anzahl dividirt.

Da aus der mittleren Tagestemp. nicht blos die Normaltemp., sondern auch alle anderen mittleren Temp. gefunden werden, so ist die Gewinnung des richtigen Tagesmittels eine der wichtigsten Aufgaben der Meteorologie. Vollkommen richtig ist dasselbe nur mit dem Thermograph zu ermitteln, indem man die Fläche der Tagestemperaturcurve durch ihre Grundlinie dividirt. Da die meisten Stationen jetzt Thermographen haben, so sind die richtigen Mittel bald zu erwarten. Die bisher angegebenen können nur als annähernd richtig betrachtet werden; denn dieselben wurden aus nur 2 oder 3 täglichen Beobachtungen gefunden. Nach dem Wiener Meteorologencongreß (1873) sollen die Beobachtungen um 6 Uhr Morgens, 2 Nachmittags und 10 Abends ein ziemlich richtiges Tagesmittel geben, die Stationen der met. Gesellschaft zu London beobachten um 7 Morgens und 9 Abends; fast dasselbe Resultat erhält man in dem arithmetischen Mittel des Max. und Min. des Tages, woraus die Bedeutung der Max.- und Min.-Therm. ersichtlich ist. — Wenn das Mittel für einen und denselben Tag in möglichst vielen Jahren bestimmt ist, so erhält man aus all diesen Tagesmitteln die normale Temp. des Tages, diejenige Temp., welche der Tag durchschnittlich gehabt hat, welche also auch für die Zukunft seine wahrscheinlichste Temp. unter allen Temp. sein wird; diese ist in den Berichten der Wetterwarten gemeint, wenn es darin heißt: die Temp. ist so und so viele Grade unter oder über der normalen. Man wendet auch hierzu in manchen Fällen das Pentadenmittel an, das Mittel aus je 5 aufeinander folgenden Tagen des Jahres, wobei jedes Jahr 73 Pentadenmittel hat; bestimmt man die Durchschnittstemp. von möglichst vielen Mitteln einer und derselben Pentade, so erhält man eine Temp., die für dieselbe Pentade in Zukunft noch größere Wahrscheinlichkeit besitzt als die normale Tagestemperatur.

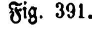
Die mittlere Temp. eines Monats wird erhalten, indem man die Summe aller Tagesmittel desselben durch ihre Anzahl dividirt; der Durchschnitt möglichst vieler Mittel desselben Monats in verschiedenen Jahren ist die normale Temp. des Monats. Die mittlere Temp. eines Jahres wird gefunden, indem man die Summe der 12 Monatsmittel durch 12 dividirt. Ist an einem Orte die mittlere Temp. vieler Jahre gefunden, so läßt sich die mittlere Temperatur des Ortes berechnen; sie ist die Summe möglichst vieler Jahresmittel dividirt durch ihre Anzahl.

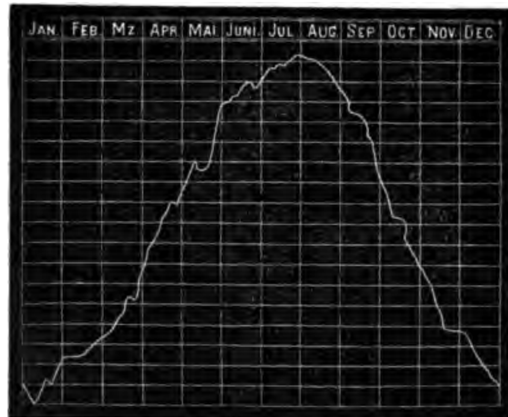
Am Aeq. ist die Mitteltemp. nahezu 27°, in Algier 20°, Mainz 11°, Berlin 9°, Petersburg 5°, Lappland 0°, Spitzbergen —10°, Nordsibirien —15°, im nördlichsten Theile des nordamerikanischen Eisarchipels —20°. Die Mitteltemp. gibt ein vergleichsweises Maß ab für die Wärme, welche die verschiedenen Erdorte vermöge ihrer geogr. Lage durchschnittlich von der Sonne empfangen, was sich dadurch bestätigt, daß die constante Bodentemp. mit der Mitteltemp. nahezu übereinstimmt. Ein anschauliches Bild für diese Vergleichung bieten die Isothermenkarten (603.). Aus den Zahlen springt auch deutlich in die Augen, daß die einem Orte zugetheilte Wärme vor Allem von seiner geogr. Breite abhängt, daß die Wirkung

der Sonnenstrahlen um so schwächer ausfällt, je kleiner ihr Neigungswinkel ist, je schiefer sie auftreffen. Dasselbe tritt auch in der täglichen und jährlichen Periode der Lufttemp. hervor. Am Morgen und Abend, wo die Sonnenstrahlen am schiefsten auftreffen, ist ihre Wirkung am geringsten, um Mittag, wo sie weniger schief oder gar senkrecht auftreffen, ist die Wirkung am stärksten; derselbe Unterschied besteht zwischen Sommer und Winter. Im Juli treffen die Sonnenstrahlen unsere Gegend unter 63°, im December unter 17°; der Sinus des ersten Winkels ist 0,9, der des letzteren 0,3; da nun die erleuchtende und wärmende Wirkung der Strahlen dem Sinus des Neigungswinkels prop. ist, so ist im ersten Zeitpunkt die wärmende Wirkung 3 mal so groß als im zweiten; rechnet man noch dazu, daß um die Sommermitte die Sonne 16 St. scheint, um die Wintermitte aber nur 8 St., so ist die jährliche Periode der Luftwärme, der Unterschied zwischen Sommer und Winter erklärt.

Indeß fällt weder in der täglichen, noch in der jährlichen Temperaturperiode das Max. mit dem höchsten und das Min. mit dem tiefsten Sonnenstande zusammen. In der täglichen Periode ist das Max. nicht um Mittag, der Zeit des höchsten Sonnenstandes, sondern 2—3 St. später, das Min. nicht um Mitternacht, der Zeit des tiefsten Sonnenstandes, sondern kurz vor Sonnenaufgang. Den Unterschied zwischen der höchsten und niedrigsten Tageswärme nennt man die tägliche Schwankung. Das jährliche Max. fällt nicht auf den 21. Juni, die Zeit des höchsten Sonnenstandes, sondern in den gemäßigten Zonen ungefähr 1 Mon. später; das jährliche Min. fällt nicht auf den 21. Dec., die Zeit des tiefsten Sonnenstandes, sondern ebenfalls ungefähr 1 Mon. später. Den Unterschied zwischen der Mitteltemp. des wärmsten und der des kältesten Monats nennt man die jährliche Schwankung.

Diese Erscheinungen rühren von der Zusammenwirkung der Einstrahlung der Sonne und der Ausstrahlung der Erde her; bei Tage finden beide statt, in der Nacht nur Ausstrahlung. Dies zeigt sich besonders darin, daß trübe Nächte milder sind als helle, da in den letzteren die Ausstrahlung nach dem kalten Weltraume ungehindert stattfinden kann, während sie in ersteren durch die Wolkendecke, den Nebel vermindert wird. Ueber den großen Wüsten ist die Luft nicht blos klar, sondern auch trocken; die Thatsache, daß dort die Nächte viel kühler werden als in den weniger trockenen, tropischen Gegenden, spricht für die Meinung Tyndalls, daß auch der klare Wasserdampf durch seine Absorption die Ausstrahlung vermindert. Wenn nun Nachts nur Ausstrahlung stattfindet, so muß die Temp. um so mehr sinken, je länger die Ausstrahlung, also die Nacht dauert, die niedrigste Temp. muß kurz vor Sonnenaufgang eintreten, da vom Beginne der Dämmerung mit dem Lichte auch Wärme von den höheren Luftschichten nach den niederen diffundirt wird. Mit Sonnenaufgang fängt die Einstrahlung an, wird bald größer wie die Ausstrahlung, wodurch die Temp. steigt. Nach Mittag ist die Einstrahlung noch ebenso groß wie vor demselben, die Temp. steigt daher noch; aber die Einstrahlung nimmt doch ab. Die Ausstrahlung dagegen, die mit der Temp. wächst, nimmt noch zu; um 2 Uhr etwa sind beide gleich groß, die Temp. nimmt nicht mehr zu. Nachher wird die Einstrahlung immer geringer, während die Ausstrahlung noch bleibt, wodurch die Temp. abnimmt. Ganz ähnlich erklärt sich die jährliche Periode; dieselbe springt in der jährlichen Temperaturcurve (Fig. 391) deutlich in die Augen, die von Dove für Berlin durch Auftragen der 73 Normaltemperaturen der Pentaden erhalten wurde. Das Max. fällt hiernach für Berlin durchschnittlich auf das Ende des Monats Juli, das Min. in die erste Hälfte des Januar. Dove findet in dem Verlaufe dieser Curve noch andere Eigenthümlichkeiten des norddeutschen Klimas


Fig. 391.



ausgesprochen, die mehr oder weniger auch für das übrige Westmitteleuropa gelten. Zunächst findet das Ansteigen und Absteigen der Curve, also auch der Temp. nicht regelmäßig, sondern mit schwachen oder starken Schwankungen statt. Der stärkste Rückfall im Frühling ist Mitte Mai, die drei Eismänner oder Gestrengen Herren, schwächere sind Ende April, Anfangs und Ende Juni. Der Maifrostrückfall findet gewöhnlich bei Nordwind statt; Mädler hielt ihn für eine Rückwirkung des Aufthauens des russischen Winters, Erman für eine Folge des Novembersternschnuppenschwarmes, der Mitte Mai zwischen Erde und Sonne vorbeigehe; Dove zeigte, daß die Erscheinung schon in Nordamerika und am Ural nicht mehr vorkomme, also unmöglich kosmischen oder russischen Ursprunges sei; er hielt sie für eine Folge des Wechsels von Polarströmen und Aequatorialströmen, den jedoch die heutige Meteorologie für unsere Gegend nicht anerkannt, Indessen war er doch der Wahrheit nahe gekommen; denn Aßmann zeigte, daß in der kritischen Zeit in Südosteuropa eine Depression herrscht, und Bezold erklärte dieselbe als Folge der ausnahmsweisen Erwärmung, die Ungarn schon Mitte Mai durch die nördlich schreitende Sonne erfährt. Die Junirückfälle, die Verderber der Rebenblüthe, geschehen gewöhnlich bei feuchtkaltem Nordwestwind, der durch die Grönländischen, in den atlantischen Ocean herabtreibenden Eisberge entstehen und seine Kälte erhalten soll. Auch im absteigenden Aste sind Mitte Sept., Oct. und Nov. Wärmerückfälle zu bemerken, deren letzter im Volke als Altweibersommer bekannt ist. — Endlich macht Dove auf den unregelmäßigeren Verlauf des Ansteigens der Curve aufmerksam und spricht seine Meinung darüber in folgendem Satze aus: „die Natur schlummert im Herbste ruhig ein und erwacht fieberhaft im Frühling.“ Er findet die Erklärung darin, daß in unserem Winter die Sonne hauptsächlich die südliche Erdhälfte, also vorwiegend Wasser bescheint, das sich wegen seiner hohen spec. Wärme langsam und stetig erwärmt und abkühlt, während sie im Sommer hauptsächlich Land bescheint, das sich rascher erwärmt und abkühlt und daher rascheren Wechsel bewirkt, was beim See- und Continentalklima näher zu besprechen ist. Wenn diese Erklärung richtig ist, so müßte auch in Nordamerika dieselbe Erscheinung beobachtet werden; allerdings ist der Herbst dort die ruhigste Jahreszeit, der Indianersommer, den der große Geist seinen Kindern für die Jagd bereitet; aber im Winter herrschen die schrecklichen Schneestürme, die zuweilen wie im Januar 1873 in Minnesota Hunderte von Menschen und zahlreiche Thiere tödten und die Cultur ganzer Landstriche vernichten; wenn dieselben nur im Nachwinter vorkämen, so würden sie nicht gegen Doves Theorie sprechen, da Nordwinde, welche die Temp. plötzlich um 20 bis 30° abkühlen, auch im Sommer häufig eintreten und äußerst schädlich wirken, wie überhaupt das Sommerklima Nordamerikas ungemein wechselvoll ist.

Die jährliche Wärmeschwankung ist am Aeq. am kleinsten, meist nur 2°, die tägliche am größten, 10 bis 20°; das erstere ist durch die äq. Lage der Ekliptik, das letztere durch die langen und klaren tropischen Nächte erklärlich. Die jährliche Wärmeschwankung ist in den polaren Gegenden am größten, steigt bis 40°, die tägliche am kleinsten; das erstere, weil im Sommer die Sonnenstrahlen fast unaufhörlich und wenig schief, im Winter aber kurze Zeit und sehr schief auftreffen, das letztere wegen der kurzen und trüben Nächte. In den gemäßigten Zonen sind die 2 Schwankungen sehr verschieden: an heiteren Tagen und in heiteren Gegenden größer als an trüben Tagen und in trüben Gegenden, was mit dem See- und Landklima zusammenhängt; z. B. in Mailand ist der jährliche Unterschied 20°, der tägliche 10, in Dublin der jährliche 5, der tägliche 7°. Auch ist die tägliche Schwankung im Winter am kleinsten, im Sommer am größten.

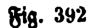
Die Isothermen (Humboldt 1817). Isothermen sind Linien auf einer Landkarte, welche Orte gleicher Mitteltemperatur verbinden; man nennt sie auch Jahresisothermen. Dieselben sind in Fig. 392 dargestellt; aus ihrem Verlaufe ergeben sich folgende Sätze über die Wärmeverhältnisse der Erde: 603

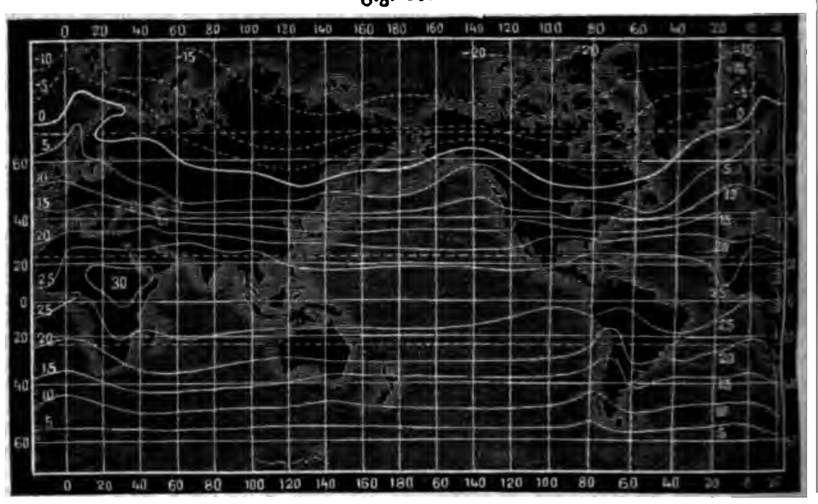
1. Die Wärme nimmt mit zunehmender geographischer Breite ab; jedoch haben Orte von derselben Breite oft sehr verschiedene Wärme, und Orte sehr verschiedener Breite häufig gleiche Wärme.

Daß die Wärme bei zunehmender geogr. Br. abnimmt, zeigen die Isothermen dadurch, daß sie ungefähr ostwestlich wie der Aeq. verlaufen und um so kleinere Temperaturzahlen tragen, je weiter sie vom Aeq. entfernt sind. Indessen hat Lappland dieselbe Br. wie Nordsibirien und doch zieht durch ersteres die dick ausgezogene Isotherme von 0°, während durch letzteres die punktirte Linie von — 15° aus dem Eismeere herabgeht. Umgekehrt zieht die Nullisotherme durch das Nordkap und Irkutsk, das 20° südlicher liegt als jenes Cap. Ebenso geht unsere Isotherme von 10° durch Dublin, das nördlicher liegt als unsere Gegend, aber auch durch Peking und Boston, die so südlich liegen wie Palermo und Neapel; also hat ein Ort wie Dublin, der 150 M. nördlicher liegt wie Palermo und Neapel, dieselbe Wärme, wie 2 Orte die gerade so südlich liegen wie diese 2 italienischen Städte. Auch

in Nordamerika zieht die Nullisotherme durch Alaschka und 15° südlicher liegende Theile von Canada. Diese Abweichungen von der geogr. Breite sind in den starken nördl. und südl. Ausbiegungen der Isothermen ausgesprochen; zur Erklärung gelangen sie bei ihren spec. Betrachtungen.

2. Die Abweichungen von dem Gesetze der geogr. Br. sind auf der südl. Halbkugel geringer als auf der nördl.


Fig. 392



Dies ist dadurch ausgesprochen, daß die Ausbiegungen der südl. Isothermen geringer sind als die der nördl. Die südliche Halbkugel besteht vorwiegend aus Meer, die nördl. vorwiegend aus Land. Das Wasser aber hat große spec. Wärme, das Land geringe; auch ist die Absorption und Emission des lockeren, rauhen, dunkeln Erdbodens größer als die des dichten, glatten, hellen Wassers; deßhalb erwärmt sich das Meer langsamer und stetiger und kühlt sich auch langsamer und stetiger ab als das Land; jedoch wirken auch die Meeresströme und Winde, wie sich bei 4. ergeben wird, in diesem Unterschiede mit.

3. In niederen Breiten ist die nördl. Halbkugel wärmer als die südl., in höheren die südl. wärmer als die nördl.; in den polaren Breiten scheint sich das Verhältniß abermals umzukehren.

Die Isothermenkarte deutet dies dadurch an, daß die Linie 25° sich nördl. vom Aeq. weiter entfernt als südlich. Jenseits 40° Breite ändert sich das Verhältniß: im N. gehört dem Parallelkreis von 50° durchschnittlich die Isotherme 5 an, südl. aber die Isotherme 8. Die Erklärung liegt im Vorwalten der Einstrahlung bei den niederen Breiten und im Vorwalten der Ausstrahlung bei höheren Br. Wo die Einstrahlung vorwaltet, muß die Gegend überwiegenden Landes, der Norden, wärmer sein als die Gegend überwiegenden Meeres, der Süden. Wo aber die Ausstrahlung vorwaltet, muß die Gegend überwiegenden Landes, der Norden, kühler sein als die Gegend überwiegenden Meeres, der Süden. In den polaren Norden ergießen sich 2 mächtige Ströme warmen Wassers, der Golfstrom und der Kuroshiwo, wodurch der polare Norden etwas weniger kalt als der polare Süden sein mag, der uns indeß noch völlig unbekannt ist.

4. In niederen Breiten sind die Landflächen wärmer als die Meere, in den gemäßigten Zonen jenseits 40° Br. sind die Continente kühler als die Meere.

Die einzige Isotherme von 30° befindet sich in Innerafrika; jedoch gibt es auch Orte von dieser Mitteltemp. in Indien und Südamerika; außerdem biegen sich die Isothermen in den Ländern niederer Br. vom Aeq. ab und in den Meeren nach dem Aeq. zu. In unseren Breiten ist ihr Verlauf umgekehrt; sie biegen sich in den Continenten nach dem Aeq. zu und erheben sich nach den Küsten hin, um in den Meeren meist noch höher zu steigen. In den niederen Br. überwiegt die Einstrahlung, das Land ist daher dort wegen seiner geringen sp. W. und starken Abs. wärmer als das Meer, von welchem auch noch ein Theil der Wärme zur Verdunstung verbraucht und durch feuchte, trübe, wolkenerfüllte Luft ab-

gehalten wird; hierdurch ist die größere Wärme des Landes in niederen Br. erklärt. In höheren Br., jenseits 40° überwiegt die Einstrahlung nur während des kurzen Sommers, sonst ist die Ausstrahlung vorwaltend. Durch die Ausstrahlung wird aber das Wasser wegen seiner hohen sp. W. und seiner schwachen Emission nur wenig und langsam abgekühlt; außerdem wird die Ausstrahlung durch die dunst- und wolkenreiche Atm. über den Meeren vermindert, und endlich sinken die durch Emission abgekühlten Oberflächenschichten der Meere hinab und wärmere, leichtere Wassermassen steigen an ihre Stelle; hierdurch wird das Ueberwiegen der Meereswärme in höheren Br. begreiflich sein.

5. Auf der nördl. Halbkugel sind die Westküstenländer wärmer als die Ostküsten, und die Westküstenländer Europas sind besonders begünstigt; auf der südl. Halbkugel sind die Westküsten kühler als die Ostküsten.

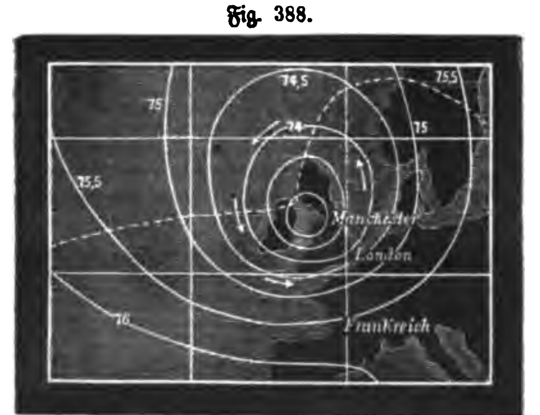
In den Isothermenkarten springen die Erscheinungen dadurch in die Augen, daß die Linien an den Westküsten sich mehr erheben als an den Ostküsten, und daß sie in Europa förmlich knieförmige Ausbiegungen weit nach Norden annehmen. Die Erklärung liegt in den Meeresströmen und in den vorwiegenden Winden. Der mächtige warme Golfstrom fließt nordöstlich nach den Westküsten Europas und der Kurosiwo nach dem nordwestl. Amerika, während die Ostküste von Asien von einem schmalen und die Ostküste Amerikas von einem breiten eisigen Strome getroffen wird, der zwischen Island und Grönland durch gerade nach Amerika hin gerichtet ist; dagegen werden die Westküsten Südamerikas von dem kalten Humboldtstrome getroffen, während an den Ostküsten der südl. Continente warme Ströme hinabgehen. — Auf der nördl. Halbkugel sind die 2 Hauptwinde der Südwest und der Nordost. Der Südwest, der über die Meere weht, gelangt feucht und warm an die Westküsten; durch Berührung des kühleren Landes, durch Mischen mit anderer Luft wird sein Wasserdampf condensirt und dessen Dampfwärme frei. An der Westküste Nordamerikas müssen die Westwinde hoch hinaufsteigen und weit über das Gebirgsland wehen, wodurch sie besonders ausgetrocknet werden; an der Ostseite des Felsengebirges fallen sie herab, verdichten ihre Luft und werden dadurch wieder etwas wärmer, also auch noch trockener. So erklärt sich das trockene Klima Nordamerikas, das rasche Trocknen von Wäsche, Brod und Holz, die Prärienbrände, das rastlose Wesen der Yankees, aber auch die geringere Wärmewirkung der Südwestwinde in Ostamerika. Durch den vom atl. Meere herwehenden Nordost wird die Feuchtigkeit und Wärme nicht ersetzt, da dieser Wind dort nie warm ist, also auch nicht feucht sein kann. Hiermit ist die niedrige Wärme von Ostamerika erklärt. Die Begünstigung von Europa durch den Golfstrom und den Südwest wird noch durch den Nordost vermehrt, da dieser wenigstens im Sommer warm ist. Dove hat in seinem berühmten Werke „Die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche" (1852) die Begünstigung und Hintansetzung verschiedener Gegenden durch die *Isanomalen* graphisch dargestellt; er berechnete aus möglichst vielen Mitteltemp. eines Parallelkreises dessen normale Temp.; die *Anomalie* ist die Differenz zwischen der Mitteltemp. eines Ortes und der normalen Temp. seines Parallelkreises; ein Ort ist begünstigt, wenn seine Anomalie positiv ist, und hintangesetzt, wenn seine Anomalie negativ ist; die Verbindungslinien von Orten gleicher Anomalie sind die Isanomalen; die Verbindungslinien aller Orte von der Anomalie Null heißen *thermische Normalen*; dieselben trennen die begünstigten Gegenden von den hintangesetzten. Aus dieser Karte ersieht man, daß ganz Europa bis zum Ural zu warm ist, England und Norwegen am meisten: ihre Anomalie beträgt + 8 bis 10°; das ganze innere und östl. Nordamerika ist zu kalt, die Anomalie beträgt — 2 bis — 6°.

Die Mitteltemp. und die Jahresisothermen geben Aufschluß über die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche, sie genügen jedoch nicht zur Erkenntniß des Klimas und des Wetters eines Ortes und zur Vergleichung des Klimas verschiedener Orte. Denn es können 2 Gegenden gleiche Mittelp. und doch verschiedenes Klima haben. So hat unser Rheingau dieselbe Mitteltemp. wie Südengland und -Irland. In dem milden Winter 1881—82 blühten auf den frühlingsgrünen Wiesen Südenglands Ranunkeln und Gänseblümchen im Januar; aber dort und in Irland sind alle Winter so mild, daß die Myrte im Freien zu großen Bäumen heranwächst, während sie in unserm kalten Winter erfriert. Umgekehrt gedeiht in dem kühlen Sommer Irlands die Rebe nicht, während unser warmer Sommer die Traube zu dem köstlichsten Weine reift. Zur Kenntniß des Klimas gehört also der Unterschied von Sommer und Winter; deßhalb führte schon Humboldt die *Isotheren* ein, die Linien gleicher mittlerer Sommertemp., und die *Isochimenen*, die Linien gleicher, mittlerer Winterwärme, und Dove hinterließ als kostbarstes Vermächtniß seiner Forscherkraft die Monatsisothermen, die eine vollständige Darstellung des Klimas der ganzen Erde bilden.

604 **Die Monatsisothermen** (Dove 1864) sind Verbindungslinien der Orte gleicher normaler Monatstemperatur. Zur völligen Darstellung sind 12 Karten nothwendig, von denen 2, die Isothermen des Januar und Juli verkleinert und ab-

eine tiefe Depression, nach außen stark zunahm und bis über 76cm stieg. Die punktirte Linie ist die Zugstraße des Minimums, der Weg, welchen die Stelle des niedrigsten Luftdruckes in wenigen Stunden zurücklegte. Die europäischen Depressionen werden gewöhnlich westlich von Irland zuerst beobachtet, wandern über Irland, England, Nordsee, Dänemark, Schweden, Ostsee, Rußland; hierbei werden die Luftdruckunterschiede gewöhnlich geringer, der niedrigste Luftdruck im Inneren steigt nach und nach, die Depression wird flach, die concentrischen Isobaren rücken weiter auseinander, das Minimum verschwindet gewöhnlich im Innern des Continents. Die Depressionen treten gewöhnlich zusammen mit Stürmen auf, ja man hält sie für die Ursachen derselben; deßhalb werden sie mit den Stürmen zusammen betrachtet; jedoch bestimmen sie auch großentheils das Wetter von Westeuropa und Nordamerika, bringen die Drehung der Winde hervor u. s. w., weßhalb die Erforschung der Minima die Hauptaufgabe der heutigen Meteorologie ist, deren Lösung indeß noch nicht erreicht ist.

Fig. 388.



3. Die Wärme der Luft.

600 **Entstehung der Luftwärme.** Wenn auch die Temp. des Weltraumes nicht den absoluten Nullpunkt (—273° C) erreicht, so ist sie doch sehr niedrig, wohl weit unter — 100°. Die innere Erdwärme mag an sich sehr hoch sein; doch ist ihr Sitz zu weit von der Erdoberfläche entfernt und die Erdschichten sind zu wenig gute Leiter, um der Oberfläche Wärme zuführen zu können; die Erdoberfläche würde daher durch Ausstrahlung in den kalten Weltraum bald alle Wärme verlieren und in tiefster Kälte erstarren, wenn nicht die Sonne fortwährend neue Wärme zustrahlen würde. Die Quelle der Luftwärme ist also die Sonne; jedoch wird die Luft nicht direct von den auftreffenden Sonnenstrahlen erwärmt, indem die Luft wärmedurchlassend oder diatherman ist und nur etwa ¼ jener Sonnenstrahlen absorbirt; den größten Theil ihrer Wärme erhält die Luft von der durch die Sonne erwärmten Erdoberfläche, theils durch die Berührung derselben, theils dadurch, daß die von dem Boden absorbirten Sonnenstrahlen in dunkle Wärme umgewandelt, als dunkle Wärmestrahlen emittirt und so leichter von der Luft absorbirt werden. Weil die Erwärmung der Luft durch den Boden geschieht, so nimmt die Temp. der Luft nach oben ab.

Längere Zeit herrschte die Meinung, daß die Luft von den directen Sonnenstrahlen nur sehr wenig oder nicht erwärmt werde, weil die elementaren Gase O, N, H für die Sonnenstrahlen durchlässig, diatherman sind. Violle stellte jedoch (1875) Messungen vom Gipfel des Montblanc nach der franz. Ebene hin an und fand, daß von der gesammten Sonnenstrahlung 94% bis in die Höhe von 5000m, 89% bis in 3000m, 79% bis in 1200m und 71% bis in 200m Höhe herabgelangen, daß also die unteren Schichten der Atm. etwa ¼ der Sonnenstrahlen absorbiren. Es ist dies leicht erklärlich, wenn man zugibt, daß der Wasserdampf nach Tyndall oder Wasserdampf und Kohlendioxyd nach Röntgen (443.) eine starke Absorption und zwar vorwiegend auf die dunkeln Strahlen ausübe. In bedeutender Höhe ist die Luft sehr trocken und arm an CO_2; deßhalb ist dort die Absorption sehr gering; in der Tiefe aber ist die Luft feucht und reicher an CO_2, weßhalb hier die Absorption jenes Viertels hauptsächlich stattfindet. Auf hohen Bergen kann daher die Sonne unerträglich heiß scheinen, während die Luft kühl bleibt; so stieg auf dem Himalaya in 3000m Höhe Hookers Therm. im Sonnenschein auf 45°, während die Temp. des beschatteten Schnees in der Nähe nur 5° betrug; auch ist in den Tropen die Hitze nicht so

merträglich, weil die Sonnenstrahlung durch den reichlichen Wasserdampf stark absorbirt
vird. In den trockenen polaren Gegenden vermag der Sonnenschein den Schiffstheer zu
chmelzen, während die Luft eisig kalt bleibt.

Daß die übrigen 3/4 der Sonnenstrahlung von dem Boden aufgenommen und durch
iesen hauptsächlich die Erwärmung der Luft vollbracht wird, ergibt sich aus mancherlei
Gründen: die mittlere Temp. der Oberfläche des Bodens ist ein wenig höher als die mittl.
Temp. der Luft; die Temp. der Luft ändert sich mit der Bodenbeschaffenheit, ist über dem
eißen Wüstenboden der Sahara am höchsten, wo in Murzuk die höchste Hitze im Freien
55°) beobachtet wurde, aber viel niedriger über dem langsam sich erwärmenden Meere selbst
m Aeq.; Tyndall stand auf dem Plateau des Montblanc bis an die Hüften im Schnee,
er trotz heißer Sonnengluth nicht schmolz, weil er nur geringe Absorption besitzt. Wenn
un der Boden auch die Luft erwärmt, so bringt doch die Sonnenwärme nicht tief ein;
n 1^{m} Tiefe ist schon der Unterschied zwischen Tag- und Nachttemp. verschwunden und in
25^{m} Tiefe der Unterschied der Jahreszeiten; hier herrscht immer die mittlere Temperatur
es Ortes, und von hier an steigt die Temp. des Bodens für je 33^{m} Tiefe um 1°. In
inem 25^{m} tiefen Keller der Pariser Sternwarte steht schon seit 60 J. ein Therm. immer
uf 11,8°, der dortigen Mitteltemp.; in Sibirien in 50° Br. ist die Mitteltemp. unter 0°,
ort ist der Boden in 3 bis 20^{m} Tiefe immer gefroren; in den Tropen, wo der jährliche
Temperaturwechsel gering ist, liegt die Schicht der constanten Temp. schon in 6^{m} Tiefe.
Wie die Sonnenwärme nicht tief eindringt, so bringt sie auch nur langsam ein. Bei einer
Messung war in London im Juli die höchste Wärme der Bodenoberfläche 21°, die höchste
er Luft 17°, die höchste in 2^{m} Tiefe 15° im Aug., die höchste in 4^{m} Tiefe 13° im Sept.,
ie höchste in 8^{m} T. 11° Ende Nov.; die niedrigste in dieser Tiefe war nur 9° und fand
m Juni statt. In sehr tiefen Kellern ist es also im Sommer wirklich (und nicht blos
cheinbar) kälter als im Winter, jedoch ist der Unterschied gering. Wasser, das in wenig
iefen Wasserleitungen fließt, ist im Sommer warm und im Winter kalt; kommen Quellen
us 10^{m} Tiefe, so ist ihr Wasser im Sommer etwas kühler als im Winter; Quellen aus
20—30^{m} Tiefe behalten ihre Temp., die der mittleren des Ortes gleich kommt; Quellen
us größerer Tiefe liefern Wasser von höherer Temp.

Daß die vom Boden absorbirten Sonnenstrahlen in dunkle Wärme verwandelt werden,
st selbstverständlich, da der Boden nur dunkle Wärme ausstrahlt; dieselbe wird wohl auch
urch Mittheilung und Strömung der Luft übertragen, aber gewiß auch großentheils von
Wasserdampf und Kohlensäure absorbirt; denn in der trockenen Luft der Wüste Sahara
inkt in der Nacht die Temp. zu empfindlicher Kühle herab. Umgekehrt steigt die Temp.
ebeutend, wenn ein Schirm angebracht wird, der die dunkeln Wärmestrahlen nicht durch-
äßt, so in einem Zimmer, auf dessen Glasfenster die Sonne scheint, in den Mistbeeten und
Gewächshäusern, deren Glaswände die hellen Sonnenstrahlen ein-, aber die dunkle Wärme
icht wieder hinauslassen; hat man ja in einem dunkeln, in Watte gebetteten und mit
nehreren Spiegelglastafeln bedeckten Kasten Wasser in einem kleinen Gefäße durch die Son-
nenstrahlen zum Sieden gebracht.

Die Abnahme der Lufttemp. bei zunehmender Höhe erklärt sich einfach: die Luft wird
ach oben immer ärmer an Wasserdampf und Kohlensäure, kann also weder von der Wärme,
ie die Sonne einstrahlt, noch von der Wärme, die die Erde ausstrahlt, ein erhebliches Maß
bsorbiren, von der letzteren um so weniger, da dieselbe schon großentheils in den tieferen
Schichten absorbirt wird. Und die warme Luft, die durch ihre Erwärmung aufsteigt, dehnt
ich nach oben immer mehr aus, kühlt sich also ab. In den Gebirgen geschieht die Abnahme
iemlich gleichmäßig mit der Zunahme der Höhe und zwar für 100^{m} um 0,6°. Die Ballon-
ahrten Glaishers (1862—66) ergaben, daß im Freien die Temp. anfangs stärker abnimmt
ls in Gebirgen, in bedeutenden Höhen aber langsamer, anfänglich für 100^{m} Höhe um 0,9°,
n 8000^{m} Höhe dagegen für 100^{m} nur um 0,2°; demnach ist im Freien schon in 2000^{m}
Höhe die Temp. meist unter dem Eispunkt; aber auch in Gebirgen liegt selbst am Aeq.
ie Schneegrenze nur 5000^{m} hoch, so daß in dem tropischen Amerika vom Fuße bis zum
Gipfel der Cordilleren alle Klimate, vom tropischen bis zum polaren vorhanden sind und
n kurzer Zeit durchwandert werden können.

601 **Beobachtung der Luftwärme.** Die Beobachtung der Lufttemp. am Therm.
nuß im Freien im Schatten stattfinden, weil sonst eine Vergleichung mit nicht
onnigen Tagen unmöglich wäre. Das Therm. muß eine solche Aufstellung in einem
Gehäuse erhalten, daß es gegen Regen und dessen Verdunstungskälte, gegen Zu-
trahlung durch wärmere und gegen Ausstrahlung durch kältere Gegenstände
geschützt ist. Für die Berechnung der mittleren Temp. ist das selbstregistrirende
Therm., der Thermograph am geeignetsten; es gibt Thermographen, die auf der
Ausdehnung eines Drahtes oder Stabes beruhen, Quecksilberthermographen, deren

mit baumartigen Farren und immergrünen Borken, mit ewig blühenden Fuchsien- und Ehrenpreisbäumen bieten großen Heerden von Papageien und andern Vögeln eine willkommene Wohnstätte.

3. Auf der nördlichen Halbkugel gibt es zwei Gegenden der größten Winterkälte (Kältepole) von — 40° mittlerer Januartemp., die eine in Nordsibirien in der Gegend von Jakuzk, die andere nördl. von dem amerikanischen Eisarchipel bei den Parrys-Inseln; die Temp. der Südpolargegend ist noch unbekannt. Die Gegenden größter Sommerhitze liegen ganz auf der nördl. Halbkugel in dem Wüstenstriche von Afrika und Asien und sind durch Arabien verbunden; hier steigt die mittlere Julihitze über 35°.

Das nordamerikanische Eisinselmeer friert im Winter zu einem compacten Eiscontinent zusammen, wo demnach dieselbe starke Ausstrahlung wie in Nordostsibirien herrscht, welche eine viel niedrigere Temperatur bewirkt als über dem offenen Eismeere. Die größte Wärme entsteht über dem Wüstenstriche, weil derselbe nahezu den Kern der Continente bildet, wo der mäßigende Einfluß des Meeres am geringsten ist, weil der trockene Wüstensand sich am stärksten erwärmt, keine Wärme für Verdunstung verzehrt, und weil die trockene, heitere Luft die fast senkrechte Zustrahlung unvermindert läßt; in Vorderasien, Mesopotamien und Pendschab reicht die größte Julihitze bis 38° nördl. Br.

4. Die Bewegungen der Luft, Winde und Stürme.

605 **Entstehung und Beobachtung der Winde.** Winde sind Luftströme, die mit wagrechter Richtung von einer Gegend höheren Luftdruckes nach einer Gegend niederen Luftdruckes wehen. Man beobachtet die Richtung und die Geschwindigkeit des Windes. Die Richtung wird durch die 8 oder 16 Weltgegenden angegeben; die Hauptrichtungen der Windrose sind: N, NO, O, SO, S, SW, W, NW; Nebenrichtungen sind NNO, ONO, OSO, SSO, SSW, WSW, WNW, NNW. Hervorgebracht wird die Richtung durch die Lage des hohen und des niedrigen Luftdruckes: Der Wind geht von einer Isobare höheren Druckes zu einer Isobare niederen Druckes, jedoch nicht senkrecht zur Isobarenrichtung, sondern wird durch die Drehung der Erde abgelenkt und zwar auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links; die Ablenkung wächst mit der geogr. Breite und mit der Geschw. des Windes, so daß bei den stärksten Stürmen die Windrichtung fast mit der Isobarenrichtung zusammenfällt. Man spricht die Ablenkung auch als Buys-Ballots Windregel (1857) aus: Ein Beobachter, der dem Wind den Rücken kehrt, hat das Minimum zur Linken; die Lage zur Linken ist um so genauer, je stärker die Ablenkung und die Luftbewegung ist; bei schwächeren Winden liegt der schwächere Luftdruck links nach vorn. Die Umkehrung dieser Regel dient am einfachsten zur Auffindung der Windrichtung aus der Lage des niedrigen Luftdruckes: Steht der Beobachter so, daß er das Minimum links vorn hat, so sieht er in der Richtung des Windes. Die Beobachtung der Windrichtung geschieht mittels der Wetterfahne, des Wetterwimpels und des Zuges der Wolken. — Die Geschw. des Windes, also auch seine Stärke wird durch den Unterschied zwischen dem hohen und niederen Luftdrucke im Verhältnisse zur Entfernung der beiden Gegenden bedingt; je größer der Luftdruckunterschied auf eine und dieselbe Entfernung ist, desto größer wird die Windgeschw. Man mißt den Luftdruckunterschied durch den Gradienten: der Gradient ist der Unterschied der Barometerstände in mm an zwei um 15 geogr. M. (1° des Aeq.) von einander entfernten Orten; manchmal wird er auch für 1 M. angegeben; bei den heftigsten unserer Stürme beträgt der Gradient 0,2—0,3^{mm} auf 1 M., bei den tropischen Orkanen steigt er auf 0,8—1^{mm}. Die Windgeschw. ist in den stärksten Stürmen Englands 30—40^{m}, in den tropischen Cyklonen 50—60^{m}; die gewöhnlichen Winde haben 1—10^{m}, die starken Winde 10—12^{m} Geschw. Man mißt die Windgeschw. mittels des

Anemometers; das gebräuchlichste ist Robinsons Schalenkreuz. Praktisch
vird die Windstärke durch Beauforts Windskala abgeschätzt, die auf der See
n 12, auf dem Lande in 6 Grade getheilt wird und auf den Wetterkarten durch
Windpfeile mit 1—6 Federn angedeutet wird.

In die Definition der Winde sind dem Sprachgebrauche gemäß nur die Luftströme mit wagrechter Bewegung aufgenommen; es gibt auch aufsteigende Luftströme, Ascensionsströme, und absteigende Luftströme, die jedoch gewöhnlich so langsam geschehen, daß vir sie (mit Ausnahme der plötzlich herabstürzenden Böen) nicht als Winde empfinden. Die Entstehung der Winde erklärte man früher durch Temperaturunterschiede der Luft, wie in 02. beim Luftströmungsgesetze geschehen; da Luftdruckunterschiede auch ohne Wärmewirkung gedacht werden können, so ist die neuere Erklärung allgemeiner, die einfach auf der leichten Beweglichkeit der Luft und der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes beruht. Wenn von 2 gleich hohen communicirenden Röhren die eine mit Queckf., die andere mit Wasser gefüllt ist, so treibt das Queckf. durch sein großes Gewicht die Flüssigkeit in dem wagrechten Verbindungsrohr nach der Wasserröhre; ebenso strömt zwischen zwei Stellen verschiedenen Luftdruckes die Luft von der Gegend höheren Druckes nach der Gegend niederen Druckes.

In wissenschaftlichen Zeitschriften und Publikationen der Wetterwarten wird die Bezeichnung der Richtungen der Windrose gewöhnlich mit großen römischen Buchstaben gegeben: S, W, N, E (nach dem englischen East für Ost statt O, das in Franz. West, Ouest bedeutet). — Die Meteorographen enthalten Einrichtungen, welche die Windrichtung registriren. In Secchis Meteorograph zeichnet die Wetterfahne (Fig. 395) die Windrichtung durch einen el. Strom auf. Der eine Poldraht der el. Batterie geht an die Drehachse der Wetterfahne, der andere theilt sich in 4 Zweige, welche um die 4 Hufeisen E und E′ (Fig. 385) im Fuße der Masch. und dann an die 4 metallischen Sectoren der Grundplatte der Wetterfahne, Fig. 395, gehen; auf diesen 4 von einander isolirten Sectoren schleift die von der Achse ausgehende und der Wetterfahne parallele Feder O, wodurch der Strom des Hufeisens geschlossen wird, das für diesen Wind bestimmt ist. Das Hufeisen zieht deßhalb seinen Anker an und mit ihm den Hebel d, der durch einen Schreibstift an seinem oberen Ende

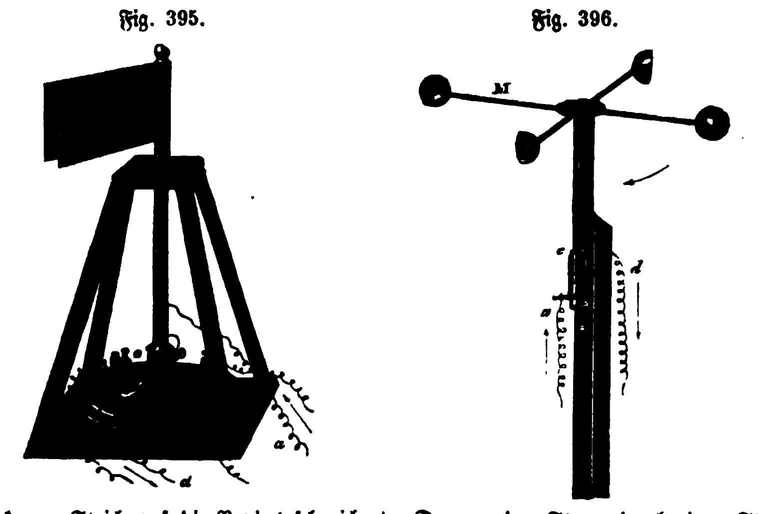


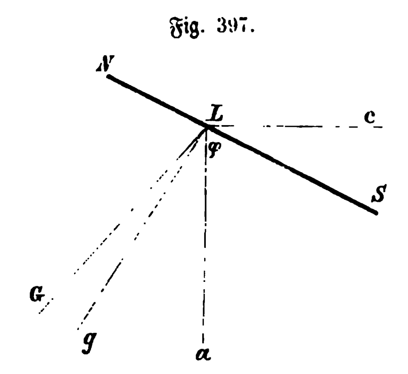
Fig. 395. Fig. 396.

inen kurzen Strich auf die Papiertafel zeichnet. Da nun der Strom durch einen Stift vie bei der el. Klingel auf den Anker und von diesem erst um das Hufeisen gelangt, so ist durch die Anziehung des Ankers der Strom unterbrochen, Anker und Hebel werden durch ine Feder zurückgezogen, der Strom wieder geschlossen und so ein neuer Strich auf die twas gesunkene Tafel gezeichnet. So lange derselbe Wind weht, zeichnet derselbe Stift Striche, beim Wechsel des Windes ein anderer Stift durch einen anderen der 4 Hebel a, b, c, d und die anderen Hufeisen; die 4 auf der Fig. 385 sichtbaren Strichsäulen geben die Dauer er 4 verschiedenen Winde an. Es gibt auch Anemographen, welche die Windrichtung ohne Vermittelung des el. Stromes aufzeichnen. Für die Windgeschw. werden kleine Windmühlen, meist aber Robinsons Schalenkreuz angewendet. Dieses Anemometer (Fig. 396) besteht aus hohlen, offenen Halbkugeln, die an den Enden eines hoch im Freien drehbar angebrachten

Stabkreuzes so befestigt sind, daß sich ihre Höhlungen nach allen 4 Weltgegenden öffnen und sich dadurch mit einer Geschw. drehen, die nach der Erfahrung etwa den 3ten Theil der Windgeschw. ausmacht, welches Verhältniß jedoch für jeden App. aufs Genaueste bestimmt und demselben beigegeben ist; aus der Zahl der Umdrehungen des Kreuzes läßt sich demnach die Windgeschw. berechnen. In Secchis Meteorograph wird die Umdrehungszahl durch ein el. Zählwerk notirt. Der eine Poldraht a geht an die Drehachse des Kreuzes, der andere d an eine neben derselben sitzende Feder c, welche bei jeder Umdrehung einmal von einer Nase der Achse berührt wird, dadurch den Strom schließt und das Hufeisen z auf dem Kopfe des Meteorographen (Fig. 385) in einen Elektromagnet umwandelt; da dessen Anker bei jeder Umdrehung des Schalenkreuzes einmal angezogen wird, so dient er als Regulator eines nebenstehenden Uhrwerks, dessen Zeiger die Umdrehungszahl angibt. Doch soll der App. die Windgeschw. auch graphisch darstellen durch die verschieden langen Linien der Windsäule V. Eine Walze des Uhrwerks wickelt nämlich eine Schnur auf, die über 2 Rollen r und r′ gehend den Stiftenhalter i seitwärts zieht, welcher vermöge der Geradführung oy in jeder Stunde eine von den wagrechten geraden Linien der Säule V zieht. Nach jeder St. wird die Walze des Uhrwerks einen Augenblick ausgeschaltet, wodurch das Gewicht p im Stande ist, den Stifthalter i zurückzuführen. — Es gibt manche andere App., welche Windrichtung und Windgeschw. zusammen aufzeichnen; das Vollendetste in dieser Beziehung ist Oettingens Windcomponentenintegrator, der jeden Wind in eine nordsüdliche und eine ostwestliche Componente zerlegt, dabei die negativen und positiven Theile jeder Componente unterscheidet und dieselben so addirt, daß 4 Summen entstehen, welche die Längen der Luftmassen darstellen, die in jeder der 4 Hauptrichtungen der Windrose über den Ort hingegangen sind; diese Summen werden durch 4 Typenräder in drucktelegraphischer Weise auf ein fortbewegtes Papier gedruckt, so daß 4 Druckcolonnen mit den betreffenden Zahlen entstehen; eine Wetterfahne und ein Schalenkreuz setzen den Apparat in Gang; auf seine Beschreibung müssen wir hier verzichten.

Die Ablenkung der Winde auf der nördlichen Halbkugel nach rechts ist so zu verstehen: Man sieht nach der Richtung, in welcher der Wind ohne die Rotation der Erde wehen würde, senkrecht zur Isobare höheren Druckes nach der des niederen Druckes hin; dann weicht der Wind nach rechts von dem Beobachter ab, auf der südl. Halbk. nach links. Früher schrieb man nur den Nord- und Südwinden die Ablenkung zu und erklärte sie durch die nach dem Aeq. zunehmende Rotationsgeschw. und das Gesetz der Trägheit (539. 6). Seitdem jedoch der Grundgedanke des Foucault'schen Pendelbeweises mehr durchgedrungen ist, kam man zu der Ueberzeugung, daß jeder Wind wie jedes Pendel, mit Ausnahme solcher am Aeq., abgelenkt werden müsse, und zwar aus demselben Grunde und nach demselben Gesetze wie das Pendel, also proportional dem Sinus der geogr. B.; denn jeder Luftstrom behält nach dem Gesetze der Trägheit wie das schwingende Pendel seine Richtung bei, während der Meridian unter ihm durch die Erdrotation seine Richtung ändert; demnach muß der Winkel, den die Windrichtung mit dem Meridian einschließt, sich verändern; da wir jedoch die Drehung der Meridiane nicht wahrnehmen können, so sind es die Windrichtungen, an welchen wir die Veränderung wahrnehmen. Ist die Winkelgeschw. der Erde $2\pi : 86164 = 0{,}0000729 = \omega$, die Geschw. des Windes $= v$ und die geogr. Br. $= \varphi$, so ist, wie Ferrel (1860 u. 1879) mit höherer Rechnung beweist, die Ablenkung in 1 Sec. $= 2 v \omega \sin \varphi$. Thiesen führt (1879) den Beweis elementar auf folgende Art. In Fig. 397 sei NS ein so kleines Stück eines Meridians, daß es als geradlinig anzusehen ist, L bezeichne irgend einen Punkt der Erdoberfläche, LG die Richtung der Erdanziehung und Lc die der Centrifugalkraft. Die Resultante Lg der beiden Kräfte ist die Schwere, deren Richtung Lg auf der Erdoberfläche NS senkrecht steht. Da die Centrifugalkraft zur Erdachse senkrecht gerichtet ist, so ist La die Achsenrichtung der Erde und der W. aLS die geogr. Breite φ; denn diese ist der W., den der Erdradius mit einem Aequatordurchm. bildet, und die Schenkel jenes W. φ, die Tang. LS und die Achsenrichtung stehen auf den Schenkeln des zweiten W. senkrecht. Ist der Radius des Parallelkreises $= \varrho$, also die Geschw. des Punktes $L = 2\pi\varrho / t$, so ist die Centrifugalkraft der Masseneinheit in $L = (2\pi\varrho/t)^2 (1/\varrho)$. Hat aber der Körper noch eine eigene Bewegung von W. nach O. mit der Geschw. v, so ist seine Centrifugalkraft $= (2\pi\varrho/t + v)^2 (1/\varrho)$. Die den Körper in die Richtung Lc treibende Kraft ist daher $(2\pi\varrho/t + v)^2 (1/\varrho) - (2\pi\varrho/t)^2 (1/\varrho)$

Fig. 397.



$= (4\pi^2\varrho^2/t^2 + 4\pi\varrho v/t + v^2 - 4\pi^2\varrho^2/t^2)(1/\varrho) = 4\pi v/t + v^2/\varrho$. Das letzte Glied v^2/ϱ ist wegen der Größe des Erdradius ϱ außer Acht zu lassen und weil t fehlt, von der Erddrehung unabhängig. Es bleibt also nur $4\pi v/t$, worin $2\pi/t = \omega$, die Winkelgeschw. der Erde ist; also ist die nach Lc wirksame Kraft $= 2\omega v$. Diese ist nun in eine Comp. in der Richtung des Lothes Lg zu zerlegen, welche die Schwere vermindert, und in eine zweite Comp. von der Richtung LS, welche gleich $2\omega v \sin\varphi$ und den Körper von der westöstl. Richtung ab in die nordsüdliche treibt, also nach rechts ablenkt. Hiernach wächst die Ablenkung mit der Geschw. des Windes und dem Sinus der Breite, ist in 30° Br. halb so groß als an den Polen und am Aeq. = Null. Denkt man sich auf den Nordpol nach dem Aeq. zu schauend, so drehen sich die westöstlich wandernden Meridiane nach links, also der Wind nach rechts; für einen auf dem Südpol stehenden Zuschauer drehen sich die Meridiane nach rechts, also die Winde nach links. Die Buys-Ballot'sche Windregel ist eine einfache Folgerung hieraus, die schon früher von Coffin und Ferrel in Amerika erkannt worden sein soll, von dem holländischen Forscher aber selbstständig gefunden und zur Vorausbestimmung der Windrichtung benutzt wurde.

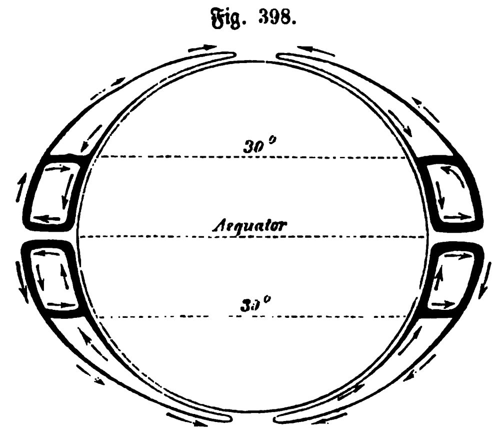
Wenn auf weiten Erdstrecken überall derselbe Barometerstand herrscht, wenn also die Gradienten = Null sind, so ist völlige Windstille; sind die Barometerstände an verschiedenen Orten wenig verschieden, also die Gadienten klein, so wehen schwache Winde. Bei dem gewaltigen westindischen Sturme vom 1. Oct. 1866 fiel das Barometer auf der Insel Nassau in 1 Std. um 18mm bis auf 703, während in 62 M. Entf. der Luftdruck 754 war, woraus leicht zu berechnen, daß der Gradient 0,8 auf 1 M. betrug. Hierdurch wird es wohl unzweifelhaft, daß der durch den Gradienten dargestellte Ueberdruck die Ursache des Windes bildet. Jedoch ist die Kraft des Windes, der Winddruck nicht gleich jenem Ueberdrucke, da der W i n d d r u c k ein hydrodynamischer Druck ist, also von der Geschw. abhängt. Guldberg und Mohn stellten (1877) den Zusammenhang zwischen Gradient und Geschw. des Windes mathematisch dar und fanden u. A. $v = \mu G \cos\alpha / k\varrho$, worin G der Gradient für 1 Meridiangrad, μ eine const. Größe $= 12237 . 10^{-8}$, k den Reibungscoëff. der Luft, α den Ablenkungswinkel und ϱ die Dichte von 1cbm Luft. Die theoretischen Geschw. stellen sich hiernach bis doppelt so groß heraus als die gemessenen, was G. und M. der Wirkung der Erdhindernisse auf die strömende Luft zuschreiben und schließlich annehmen, daß die Geschw. der Winde, übereinstimmend mit Beobachtungen, in der Höhe 1 bis 2 mal so groß sei als am Boden oder an der Stelle der Anemometer. Die Größe des Winddruckes mit Apparaten zu messen, ist noch nicht gelungen; auch bietet derselbe kein meteorologisches Interesse. Gleiches gilt auch von der W i n d s t ä r k e, der leb. Kft. oder Energie des Windes, die der Wind zu leisten vermag. Die dafür eingeführte B e a u f o r t'sche S e e s k a l a hat 12 Stufen, die nach der Geschw. und Segelführung des Schiffes abgeschätzt werden: hiernach hat man auch eine L a n d s k a l a mit 6 Stufen, deren Nummern denen der Seeskala entsprechen, aber durch Windwirkungen auf dem Lande abgeschätzt und durch 0—6 Befiederungen an den W i n d p f e i l e n dargestellt werden, deren Richtungen auf den Wetterkarten die Windrichtungen angegeben.

Nr.	Bezeichnung.	Benennung.	Geschw. in m.	Charakteristische Wirkungen des Windes.
0	———○	Stille	0—0,5	Der Rauch steigt gerade auf, kein Blättchen regt sich.
2	/———○	Schwach	0,5—4	Wimpel u. Blättchen regen sich, der W. ist fühlbar.
4	//———○	Mäßig	4—7	Wimpel streckt sich, Blätter u. kl. Zweige bewegen sich.
6	///———○	Frisch	7—11	Größere Baumzweige bewegen sich.
8	////———○	Stark	11—17	Aeste und schwache Bäume bewegen sich, der W. hemmt das Gehen.
10	/////———○	Sturm	17—28	Ganze Bäume bewegen sich, Aeste brechen.
12	//////———○	Orkan	28—40	Bäume werden entwurzelt u. Häuser abgedeckt.

Beständige und mittlere Winde sind solche Winde, welche in einer Gegend [606] unaufhörlich oder vorherrschend wehen; sie gehen aus der allgemeinen Vertheilung des Luftdruckes auf der Erde hervor. Die Region der beständigen Winde erstreckt sich bis zu 30° nördl. und südlicher Breite; in dem nördlichen Theile herrscht ununterbrochen der Nordost-Passat, in dem südlichen der Südost-Passat; die beiden Passatregionen sind durch die Region der Windstillen oder Calmen getrennt, die einige Grade nördlich vom Aequator umfaßt.

Am Aequator herrscht der mittlere Luftdruck von 760, in 30° nördlicher und südlicher Breite der höhere Luftdruck von 765; folglich strömt die Luft von diesen Gegenden ununterbrochen nach dem Aeq. zu, nördl. vom Aeq. entsteht ein Nordwind, südlich ein Südwind. Durch die Rotation der Erde wird jeder Wind auf der nördl. Halbkugel nach rechts, auf der südl nach links abgelenkt; folglich fließt der Nordwind nicht ungeändert nach Süden, sondern nach rechts, also nach Westen ab, er wird NO; umgekehrt wird der Südwind nach links abgelenkt, er fließt nicht genau nach Norden, sondern etwas nach links, nach Westen, er wird SO. Zwischen diesen beiden Passatwinden liegt die Zone, in welcher die Luft durch ihre Hitze und Feuchtigkeit nur aufsteigt, wo der Ascensionsstrom herrscht und keine wagrechte Luftbewegung zu Stande kommt, die Region der Calmen. Von hier fließt in der Höhe wegen der Erhebung der Flächen gleichen Luftdrucks die Luft nach Norden und Süden ab, senkt sich in ca. 30° herab, erzeugt den hohen Luftdruck, vermöge dessen sie unten nach dem Aeq. fließt. In der tropischen Gegend herrscht also (Fig. 398) ein völliger Kreislauf der Luft, am Aeq. Aufsteigen, in der Höhe Abfließen vom Aeq. (Aequatorialströme), in 30° Absteigen, in der Tiefe Zufließen zum Aeq. (Polarströme); es wehen dort zwei entgegengesetzte Winde übereinander, unten der Nordost- oder Südost-Passat, oben der Südwest- oder Nordwest-Antipassat; denn diese zwei hohen Aequatorialströme werden durch die Rotation der Erde westlich, da der nördl. nach rechts, nach Osten, der südl. nach links, auch nach Osten fließt, also beide eine westliche Componente enthalten. Das Dasein der Passate, des NO und SO, bedarf keines Beweises, jeder Bewohner der dortigen Gegend spürt sie immer, die Segelschiffe werden auf den großen Weltmeeren von ihnen nach Westen getrieben. Das Dasein der Antipassate in der Höhe aber muß bewiesen werden; dies geschieht durch deu Zug der hohen weißen Feder- oder Cirruswolken, durch die Rauchsäulen hoher Vulkane,

Fig. 398.



durch Fortführung vulkanischer Asche nach Nordosten, während unten stets NO weht (St. Vincent nach Barbados 1812), sowie durch directe Beobachtung auf hohen Bergen; der Aequatorialstrom wird nämlich in seiner bedeutenden Höhe abgekühlt, dadurch schwerer und sinkt allmälig herab, (Fig. 398), so daß er in größerer Entf. vom Aeq. schon auf Berggipfeln merkbar ist; so weht auf dem Gipfel des Mauna-Loa (4200m) SW, während unten in Hawai (20°) NO herrscht; in 30° ist der SW schon auf dem Pic von Teneriffa (3700m) merkbar, während unten in Santa-Cruz unausgesetzt der NO weht. — Halley (1687) hat zuerst die Passatwinde durch den Wärmeunterschied zwischen dem Aeq. und den höheren Breiten erklärt, während Hadley (1735) den Einfluß der Erdrotation erkannte.

Die Sonne entfernt sich in unserem Sommer durchschnittlich 10° nach Norden zu vom Aeq.; so hat auch die Region der Calmen im Sommer die Lage zwischen 3 und 10° nördl. Br., und rückt die Region des Nordostpassats im Sommer um 10° weiter nach Norden; daher hat die Gegend zwischen 30 und 40° nördl. Br. im Sommer NO; analog die Gegend zwischen 30 und 40° südl. Br. in unserem Winter SO. Diese Gegenden heißen die subtropischen Zonen; in denselben herrscht in ihrem Sommer der Passat, in ihrem Winter veränderliche W., meist SW und NW. — In noch größerer Entf. vom Aeq., jenseits 40° nördl. und südl. Br. ist die Region der veränderlichen Winde, die Herrschaft der wandernden Minima. Darnach läßt sich die Erde (Fig. 399) in viererlei Windzonen theilen: 1. Die Zone der Calmen, am Aeq, jedoch immer nördl. gelegen. 2. Die Passatzonen bis zu 30° nördl. und südl. Br. 3. Die subtropischen Zonen zwischen 30 und 40° Br. 4. Die Zonen der veränderlichen Winde jenseits 40° Br.

Indessen gibt es in den Zonen der veränderlichen Winde dennoch vorherrschende oder mittlere Winde; so liegt in Westeuropa die Hälfte aller Winde zwischen S und W. Dies erklärt sich aus der Vertheilung des Luftdruckes; nach der Januarisobarenkarte (Fig. 387) ist zur Winterzeit im Nordwesten von Europa ein bleibendes Minimum und südlich ein Max. des Luftdruckes, also ist nach Buys-Ballots Windregel SW vorherrschend, denn dieser Wind hat das isländische Min. links vorn. Im Winter herrschen die Westwinde sogar vor bis tief nach Sibirien hinein. Auch im Sommer liegt das Max. südlich, aller-

dings im atl. Ocean (Fig. 386), muß also auch hier noch vorherrschend SW und W erzeugen; jedoch ist NW häufiger wegen des sibirischen Minimums. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse in Nordwestamerika. Sehr verschieden gestalten sie sich in den Ostländern der Continente. In Ostasien und Ostamerika ist im Winter die Hälfte aller Winde N und NW, weil sie nicht weit entfernt im Binnenlande ein Max. und im Meere ein Min. haben, was nach der Windregel N und NW erzeugt; hiermit ist der Gegensatz des trocken kalten Winters der Ostländer gegen den feuchtmilden der Westländer erklärlich. Im Sommer haben die Ostländer das Min. westlich, im Binnenlande, weßhalb jetzt S und SO vorherrschen, also das Klima feucht und dadurch kühl machen; die Ostküstenländer haben demnach im Winter Continentalklima, im Sommer Seeklima, nach Dove gemischtes Klima, in beiden Fällen die Temp. herabdrückend. Diese nach den Jahreszeiten wechselnden Winde der Ostländer können schon zu den periodischen Winden gezählt werden.

Fig. 399.



Periodische und locale Winde. Periodische Winde sind solche, die zu bestimmten Tages- oder Jahreszeiten wehen und gewöhnlich mit diesen Zeiten die Richtung umkehren. Zu denselben gehören die Land- und Seewinde, die Monsune, die Etesien. Locale Winde sind solche, die an bestimmten Orten mit charakteristischen Eigenschaften zu bestimmter oder unbestimmter Zeit auftreten, wie der Föhn in der Schweiz, der Scirocco und die Bora im adriatischen Meere, der Chamsin in Aegypten, der Harmattam in Guinea u. v. a. 607

Die Land- und Seebrisen entstehen durch die stärkere Erwärmung des Landes bei Tage und seine raschere Abkühlung bei Nacht; bei Tage ist die Seeluft kühler als die Landluft, deßhalb strömt unten die Luft von der See nach dem Lande; an den tropischen Küsten, wo der Unterschied am stärksten ist, beginnt die frische Seebrise etwa um 9 Uhr Morgens, mildert wesentlich die tropische Hitze, zerstört die Miasmen und macht so diese Gegenden wohnlich, ja heilsam für Europäer; gegen Abend weht sie am stärksten und führt die Segelschiffe in den Hafen. Bei Nacht aber ist die Landluft kühler als die Seeluft, die Seebrise wird bald durch den entgegengesetzt wehenden Landwind ersetzt, der gegen Morgen seine größte Stärke erreicht und die Segelschiffe aus dem Hafen führt. In den Höhen herrschen natürlich die entgegengesetzten Winde, wie der Luftschiffer in Madras erfuhr, der auf den Seewind vertrauend, zu bedeutender Höhe aufstieg und ins Meer hinausgeweht wurde. Den Land- und Seewinden im Wechsel ähnlich sind die Gebirgsthalwinde, indem bei schönem Wetter tagsüber ein Unterwind thalaufwärts, nachts ein Oberwind thalabwärts weht. In den Niederungen erheben sich an schönen Tagen die Flächen gleichen Luftdruckes ziemlich hoch, erhalten ein Gefälle gegen das Gebirge hin und setzen daher die Luft an den Bergwänden, die durch deren Wärme aufgelockert, leicht und aufwärts strebend geworden ist, nach der Höhe in Bewegung. In der Nacht sinken in den Niederungen die Flächen gleichen Luftdruckes, wodurch an den Bergwänden der Druck größer ist als außerhalb, was noch durch die nächtliche starke Abkühlung der Bergwände verstärkt wird; so strömt die Luft nächtlich an den Bergwänden herab.

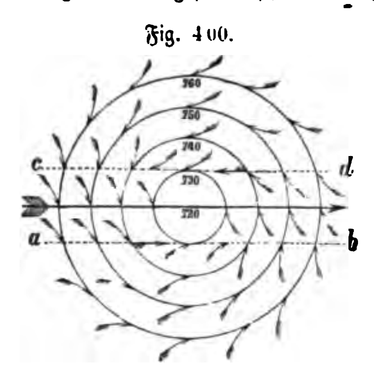
Die Monsune wurden zuerst von Arabien, Persien und Ostindien bekannt, wo im ganzen Sommer wie im indischen Ocean nördlich vom Aeq. statt des NO-Passats ein SW.-Monsun weht; derselbe ist eine Folge der Erhitzung von Südasien, wodurch hier eine starke Ascension, eine Wärmecalme und ein niedriger Luftdruck entsteht; deßhalb strömt von dem kühleren indischen Ocean die Luft nach der Calmengegend, welcher S durch die bekannte Ablenkung SW wird. Im Winter herrscht in der ganzen Gegend der regelrechte NO-Passat, NO-Monsun genannt. Dann bildet sich aber ein anderer Monsun im Osten des indischen Oceans, da nun Neuholland in seinem Sommer eine Wärmecalme erzeugt, welche die Luft südlich vom Aeq. anzieht, einen N erzeugt, der durch die Ablenkung NW wird. Daß in China im Sommer ein SO, im Winter ein N und NW weht, wurde schon erwähnt. Aehnliche mit den Jahreszeiten wechselnde Winde kommen aus analogen Gründen in anderen Gegenden vor.

Von den localen Winden hat für uns das größte Interesse der Föhn in der Nord-

schweiz, der „Schneefresser", der durch seine warme Trockenheit starke Feuersbrünste verursacht. Naht der französ. atl. Küste ein Minimum, so entstehen südlich von den Alpen Südost- und Südwinde; dieselben steigen die Alpenthäler hinauf, erhalten durch deren Enge weitere sturmartige Geschw., werden beim Aufsteigen abgekühlt, condensiren dadurch ihren Wasserdampf an den Südhängen zu ungeheuren Schnee- und Regenmengen, deren freiwerdende Dampfwärme die stärkere Abkühlung hindert. Auf dem Gebirgskamme angelangt stürzen sie als saugende Luftstrahlen in wagrechter Richtung weiter, saugen die Luft der Nordschweiz an und bewirken so ein plötzliches Fallen des Barometers. Weiter im Norden stürzen sie dann mit stoßender Gewalt herab und wühlen die Seeen zu meereshohen Wogen auf. Durch dieses Herabstürzen werden sie verdichtet, wärmer und noch trockener, womit ihre hohe Temp. und stark trocknende Wirkung erklärt ist. Im adriatischen Meere entsteht ein SO, der durch die Gebirge Italiens in den heißen Scirocco umgewandelt wird. Liegt das Min. südlicher, so entsteht in den südl. Alpenthälern ein Nordföhn. Das adriatische Meer und andere östliche Meere erhalten dann einen N oder NO, der trocken über die Hochplateaus der kalten Gebirge geweht ist und von diesen stoßweise herabstürzend als Bora durch seine Kälte verwüstend wirkt.

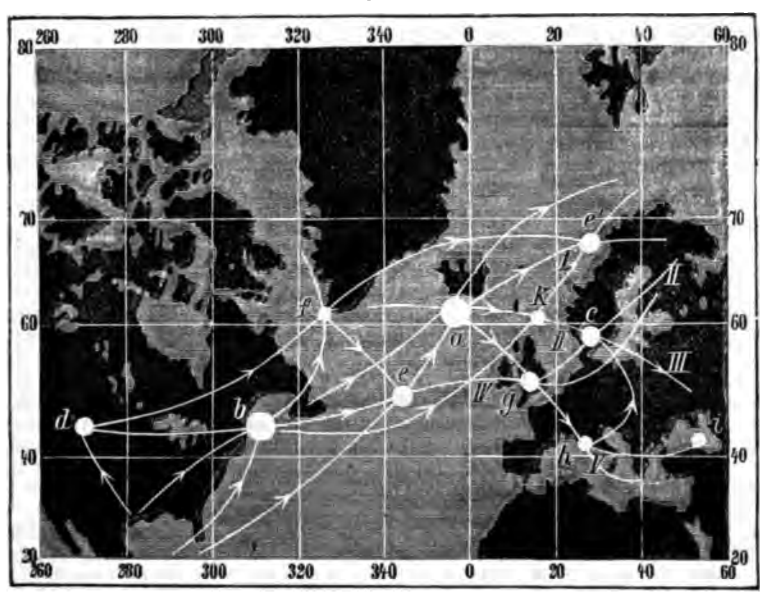
608 **Veränderliche Winde. Wandernde Minima. Stürme.** Die Region der veränderlichen Winde ist auch die Region der wandernden Minima, und die Stürme treten immer zusammen mit den Depressionen auf; „im Winter jagt oft lange Zeit hindurch ein Minimum oder Sturmfeld das andere" (Hann); hierdurch ist die Zusammengehörigkeit der drei Erscheinungen angedeutet. Um ein Maximum nimmt nach allen Richtungen der Luftdruck nach außen ab, von einem Minimum oder einer Depression nach allen Richtungen zu. Nur selten oder wohl nie sind die Isobaren einer Depression so regelmäßig wachsende concentrische Kreise, wie es in Fig. 400 dargestellt ist, wo der geringste Luftdruck 720 beträgt und der Barometerstand regelmäßig zunimmt; vielmehr sind die Depressionen unregelmäßig elleptisch. Von einem Max. aus fließt die Luft in allen Richtungen nach außen, jedoch nicht in geraden Linien, sondern auf der nördlichen Halbkugel wegen der Ablenkung nach rechts in gekrümmten Bahnen im Sinne der Uhrzeigerbewegung. Nach einem Min. strömt die Luft von allen Seiten nach innen, aber nicht in geraden Linien, sondern auf der nördl. Halbkugel wegen der Ablenkung nach rechts in immer enger werdenden Spiralen, deren Zug der Uhrzeigerbewegung entgegengesetzt ist. Auf der südl. Halbkugel werden beide Bewegungen wegen der Ablenkung nach links die umgekehrten. Man nennt die Luftbewegung um und nach einem Min. hin eine Cyclone, wodurch für die Bewegung von dem Max. weg der Name Anticyclone entstanden ist. Da beide Bewegungen oft Tage lang anhalten (die Anticyclone noch länger), so muß im Centrum einer Anticyclone ein absteigender und im Centrum einer Cyclone ein aufsteigender Strom vorhanden sein. Man hält diesen Ascensionsstrom für die Ursache der Dauer des Minimums im Innern der Cyclone, ist jedoch über seine Entstehung noch nicht im Klaren. Die Spiralbahn jedes Lufttheilchens einer Cyclone ist da zu Ende, wo dasselbe in den Ascensionsstrom gelangt, also im Minimum selbst; hier geht die wagrechte Bewegung in eine aufsteigende über, im Centrum einer Cyclone findet nur Ascension statt, am Orte des Min. herrscht Windstille. Um diese Centralcalme bewegen sich die Luftmassen in ihren Spiralbahnen mit um so größerer Geschw., je größer die Gradienten sind, und da hier Gradienten von 1^{mm} per M. vorkommen, so können Sturmgeschwindigkeiten von $30-50^{m}$ entstehen; nach außen nimmt die Geschw. ab; bei kleinen Gradienten ist die Be-

Fig. 400.



wegung innen wie außen eine schwache. Die veränderlichen Winde sind nun größtentheils nichts anderes als die äußeren Theile einer Cyclone, die von dem Centrum viele M. entfernt sein können. Die Richtung der Winde ist durch die Lage des Centrums und Buys=Ballots Windregel bestimmt. In Fig. 400 gibt jeder Pfeil die Richtung des an seiner Stelle herrschenden Windes an; jeder Pfeil ist so gerichtet, daß ein in seiner Richtung schauender Beobachter den niedrigsten Luftdruck 720 links vorn hat. Bliebe das Min. immer an einer Stelle, so würde z. B. der Ort b immer S und c immer N haben; ein Maximalgebiet bleibt bekanntlich gewöhnlich lange an einem Orte, weßhalb Wind und Wetter in einer Anticyclone sich wenig ändern. Die Depressionen aber (ausgenommen die durchschnittlichen Minima) bleiben nicht an ihrer Stelle, sondern wandern gewöhnlich von Westen nach Osten, in Nordamerika durchschnittlich 135, im atl. Ocean 105, in Europa 85 M. per Tag. Dabei verfolgen die meisten und zwar gerade die tiefsten und wirkungsreichsten Minima bestimmte Bahnen, die man **Zugstraßen** der Minima nennt. Fig. 401 ist die Zugstraßenkarte von Köppen (1882), in welcher

Fig. 401.



die Bahnen als weiße Linien in den dunkeln Continenten und grauen Meeren erkennbar sind. Die nordamerikanischen Cyclonen befolgen meist die Straße db, indem jährlich mehr als 40, getrennt durch ebensoschnell laufende Maxima auf dieser Bahn das so veränderliche Wetter der Union erzeugen; der atlantische Ocean enthält ein ganzes Netz von Zugstraßen, und für Europa sind 5 von Bedeutung: I. von Nordschottland nach den Lofoden, II. von Shetland durch Südskandinavien nach dem weißen Meere zu, III. von Shetland denselben Weg nach Südrußland, IV. von Südirland durch Nord= und Ostsee nach Finnland, V. von Südirland durch Frankreich nach Corsika und von dort dreitheilig. In Europa ziehen oft die nach einander entstehenden Minima dieselbe Straße fort, wodurch das Wetter längere Zeit beständig bleibt. Nach van Bebber (1882/84) hat auch die Zugstraße wie der Wind selbst den höchsten Druck rechts, aber auch die höchste Tempe=

ratur rechts, und fällt die Richtung der großen Achse des elliptischen Minimums in die der Zugstraße, wodurch es möglich wird, letztere zu bestimmen.

Geht die Cyklone Fig. 400 in der Richtung des großen Pfeiles fort, so geht sie in der Richtung b a über den Ort b; derselbe hat also wie die Windpfeile zeigen, anfänglich SO-Wind, dann S, später SW, dann W und schließlich NW. Hiermit erklärt sich Doves Winddrehungsgesetz (1837): der Wind dreht sich wie die Sonne nach rechts, von O über S nach W und N; doch gilt dasselbe nur für Mittel- und Südeuropa, die nordamerikanische Union und alle Gegenden, die rechts von der Zugstraße liegen, während für links von der Zugstraße liegende Orte die Winddrehung entgegengesetzt stattfindet. Man spricht daher das Dove'sche Gesetz jetzt allgemeiner so aus: Liegt eine Gegend rechts von der Zugstraße, so dreht sich der Wind nach rechts; liegt ein Ort links von der Zugstraße, so dreht sich der Wind nach links.

Rechts und links von der Zugstraße ist so zu verstehen, daß man sich in die Zugstraße denkt, das Gesicht nach der Seite gewendet, wohin das Minimum geht, dann haben alle Punkte rechts vom Beobachter (unterhalb des großen Pfeils in Fig. 400) Rechtsdrehung des Windes, die Winde drehen sich wie die Sonne von O über S nach W; man nennt die Sonnendrehung rechts, weil wir die Sonne immer im Süden sehen, also ihre östliche Aufgangsstelle links, ihre westliche Untergangsstelle rechts, sie geht also bei Tage von links nach rechts. Auch die Rechtsdrehung der Winde ist so zu verstehen, daß der Beobachter in die Richtung schaut, wohin die Luft fließt, daß also der Wind direkt seinen Rücken trifft; dann fließt nach kürzerer oder längerer Zeit mit allmäligen oder schroffen Uebergängen die Luft mehr oder weniger nach rechts, der Wind trifft mehr den linken Arm des Beobachters; herrscht z. B. N, so fließt die Luft nach Süden, der Beobachter muß nach Süden sehen und wird dann bald finden, daß die Luft nach dem rechts von ihm liegenden Südwest hinfließt, daß also der N in NO übergegangen ist; ebenso geht bei der Rechtsdrehung der O in SO, der S in SW, der W in NW u. s. w. über. Bei der Linksdrehung ist alles umgekehrt; sie findet für Orte statt, die links von der Zugstraße liegen (in Fig. 400 oberhalb des großen Pfeils), da auf dem Striche cd nach Buys-Ballots Windregel die Windpfeile zuerst SO, dann O, später NO und schließlich N und NW anzeigen; so geht in Alaska, Canada, Hudsonsbai, Island, Spitzbergen, Lappland der O durch N in W über. Jedoch kann auch in einer und derselben Gegend ein Zurückdrehen oder Krimpen des Windes stattfinden; wenn z. B. bei uns ein Minimum im Norden sich immer mehr verflacht und endlich verschwindet, dagegen ein neues das mittelländische Meer entlang zieht, so ist unsere Gegend links von der Zugstraße des letzteren, der Wind, welcher sich bisher von SO über S nach SW und W gedreht hatte, springt plötzlich nach O um und dreht sich dann über N nach W. — Das Verständniß der Winddrehung läßt sich auch ohne die Cyklonenform gewinnen, indem man nur die Lage des Min., die Ablenkung durch die Erde oder die Windregel benutzt. Taucht z. B. bei Irland, westlich von uns, eine Depression auf, so sollten wir S haben, der durch die Erdrotation SO wird; rückt nun das Min. auf die Nordsee, so haben wir nach der Windregel SW; geht das Min. bis nach Südrußland östlich von uns, so erhalten wir nach der Windregel NW, der Wind drehte sich also von O über S nach W.

Die deutsche Seewarte hat in den letzten Jahren die europäischen Min. eingehenden Forschungen unterzogen, welche, wie die theilweise schon angeführten Arbeiten van Bebbers u. Köppens beweisen, schöne Resultate erzielt haben, die zu der Vermuthung führen, daß auch die gewöhnlichen Depressionen, wie die Stürme auf dem Golfstrome entstehen. Zu den Resultaten gehört die Anzahl der Min. auf den 5 Zugstraßen nach den Jahreszeiten: Auf den Zugstraßen I—III ziehen die Minima großentheils im Winter, auf IV im Sommer und auf V im Frühling, was offenbar mit den Lenzfrösten zusammenhängt. Weiter sind im Sommer die Zugstraßen den Isothermen fast parallel, während sie dieselben im Winter unter etwa 45° schneiden, was mit der Lage der Zugstraßen, rechts den höheren Gradient und die höhere Temp., zusammenhängt, sowie mit der Höhenerstreckung der Cyklonen, deren Stärke bei wachsender Höhe rasch abnimmt. Nicht alle Minima folgen den Zugstraßen; man nennt diejenigen, welche andere Bahnen, gewöhnlich mit geringer Geschw. und Tiefe einschlagen, erratische Minima. Wenn die beiden auf das Min. wirkenden Elemente, Druck und Temp., gleich stark aber entgegengesetzt wirken, so wird das Min. stationär, nimmt manchmal die Gestalt einer den Isothermen und Isobaren sich anschmiegenden Zunge niedrigen Luftdruckes an und entsendet Theilminima, die in ganz ungewöhnlichen Bahnen, Druck und Temp. entsprechend fortschreiten. Köppen hat insbesondere die Kreuzungsstellen der Zugstraßen, die er Strahlungsgebiete der Minima nennt, ins Auge

:faßt; in Fig. 401 sind sie als weiße Kreise a bis h dargestellt; sie scheinen bei der Entehung der Min. mitzuwirken. Zunächst ist auffällig, daß sie an den Grenzen von Land nd Meer und auf den Grenzen des Golfstromes liegen, ein Fingerzeig für die Entstehung :r Min.; darauf deutet wieder, daß hier anlangende Min. für längere Zeit stationär, ja :trograd werden, daß Theilminima von ihnen ausgehen, daß die Bahnen der erratischen Rin. gewöhnlich Verbindungslinien der Centralgebiete sind, und daß endlich stationäre Min. h häufig in ihnen ausbilden oder befinden. So fallen die 3 subarktischen Strahlungsge-.ete f, a und e′ in die Gegenden, wo nach Hoffmeyer die niedrigsten Luftdrucke auf der rde herrschen, und wo deßhalb telegraphische Wetterstationen errichtet werden müßten, enn die Wetterprognose Sicherheit gewinnen soll.

Nicht bloß die veränderlichen Winde, sondern auch die Stürme haben ihre rsache in den wandernden Depressionen; denn alle Isobarenkarten von Sturmtagen :igen die concentrischen Curven einer Cyklone und zwar da, wo der Sturm geerrscht hat, wie z. B. die Karte des Sturmes vom 18. Nov. 1864 (Fig. 388) der van Bebbers 2 Wetterkarten vom 14. Okt. 1882 (Fig. 402/3); also sind lle Stürme Cyklonen oder Wirbelstürme mit großen Gradienten. Wegen der roßen Geschw. der Luft ist auch die Ablenkung groß, die Sturmrichtung fällt iit der Isobarenrichtung zusammen, das Min. liegt immer ganz links von der sturmrichtung; die große Centrifugalkraft in den inneren Theilen einer Cyklone :reinigt die Spiralströme zu einem Wirbelstrome. Im atlantischen Ocean beträgt :e Zahl der jährlichen Stürme von und über der Beaufort'schen Stufe 8 in 5—60° Br. überall mehr als 150, wovon auf die Sommerzeit noch nicht 30 llen, also weitaus die meisten im Winter stattfinden; viel geringer ist die Zahl ı der tropischen Zone, am Aeq. gibt es keine Stürme und in 5—10° Br. durchhnittlich 2; die tropischen Stürme ersetzen die Zahl durch ihre ungeheure Gewalt nd werden deßhalb speciell betrachtet. Die Entstehung der Stürme in höheren reiten ist noch nicht bekannt; wahrscheinlich wirkt der Golfstrom mit, den die eefahrer „Sturmkönig“ nennen.

Geht ein nordatlantischer Sturm mit seinem Centrum, dem Minimum, über einen rt hinaus, so ist der Verlauf der Erscheinung stets der folgende: „Nach einer Periode höner trockener und kalter Wintertage bedeckt sich der Himmel nach und nach, die Luft wird uchter, die Temp. mildert sich plötzlich, der Wind dreht sich in die Südregion, und das arometer fängt an zu fallen, anfänglich langsam, dann mit zunehmender Raschheit, 1, 2, mm per Stunde. Die Luft wird trüber, Regen beginnt zu fallen, wird stärker und stärker nd breitet sich weit aus. Während dessen hat sich auch der Wind immer mehr verstärkt, eht aus SSO und SO, in welcher Richtung er am längsten verharrt; seine Geschw. ericht 10, 15, 20 m, bis bei 35 m der Orkan seine höchste Wuth erreicht hat. Immer noch auert der Regen fort und das Barometer fällt und fällt. Aber bald verzögert sich sein turz, der Wind verliert etwas von seiner Heftigkeit, während er in West übergeht; gleich rauf bricht er in furchtbaren Stößen aus, schleudert Blitze und Hagel und weicht plötzlich r Windstille, wobei das Barometer einen Sprung von 1 bis 2 mm macht und der Himmel h rasch aufklärt. Die eine Hälfte des Firmaments ist ganz Regen und Dunkelheit, — e andere heiteres, stilles Himmelblau. Wenn die Grenze der Wolkenschicht sich nach Osten tfernt, sieht der Beobachter, daß der ganze Aufruhr den tiefen Schichten der Atm. angert, denn über der dünneren Wolkendecke ist die Luft ruhig und heiter, während unter ihr turm, Regen und Gewitter toben. Der unerfahrene Beobachter hält das Ungewitter für isgetobt, denn der Himmel bleibt heiter, die Windstille dauert fort, das Barometer steigt. ber bald fliegt aus NW ein Wolkenballen herbei, der „Cumulus“ der Meteorologen, der Baumwollballen“ der Matrosen, andere Wolken von gleicher Form folgen ebenso rasch, id der Sturm tobt plötzlich mit erneuter Wuth aus NW; die zweite Phase des Sturmes icht los, deren erste Stöße die schrecklichsten sind. Die Luft, die uns jetzt trifft, ist trocken id kalt, es regnet nicht mehr, zwischen den dicken weißen Wolken scheint der blaue Himmel rch; jedoch die Geschw. der Wolken nimmt nicht mehr zu, die Heftigkeit des Sturmes ßt allmälig nach, er wendet sich von NW zu NNW, das fortwährend gestiegene Barometer eibt endlich stehen und der Sturm ist zu Ende.“ (Rysselberghe, les tempêtes d'Europe).

Dieser Verlauf des Sturmes erklärt sich durch die Eigenschaften der Cyclone in dem littelstriche, der durch den großen Pfeil (Fig. 400) bezeichnet ist; die Windrichtung ist auf r rechten Seite, die zuerst über den Beobachter hingeht, durchgängig südlich, bringt also arme, feuchte Luft, die das Steigen des Therm. und das Fallen des Barometers erklärt,

ratur rechts, und fällt die Richtung der großen Achse des elliptischen Minimums in die der Zugstraße, wodurch es möglich wird, letztere zu bestimmen.

Geht die Cyklone Fig. 400 in der Richtung des großen Pfeiles fort, so geht sie in der Richtung b a über den Ort b; derselbe hat also wie die Windpfeile zeigen, anfänglich SO-Wind, dann S, später SW, dann W und schließlich NW. Hiermit erklärt sich *Doves Winddrehungsgesetz* (1837): der Wind dreht sich wie die Sonne nach rechts, von O über S nach W und N; doch gilt dasselbe nur für Mittel- und Südeuropa, die nordamerikanische Union und alle Gegenden, die rechts von der Zugstraße liegen, während für links von der Zugstraße liegende Orte die Winddrehung entgegengesetzt stattfindet. Man spricht daher das Dove'sche Gesetz jetzt allgemeiner so aus: *Liegt eine Gegend rechts von der Zugstraße, so dreht sich der Wind nach rechts; liegt ein Ort links von der Zugstraße, so dreht sich der Wind nach links.*

Rechts und links von der Zugstraße ist so zu verstehen, daß man sich in die Zugstraße denkt, das Gesicht nach der Seite gewendet, wohin das Minimum geht, dann haben alle Punkte rechts vom Beobachter (unterhalb des großen Pfeils in Fig. 400) Rechtsdrehung des Windes, die Winde drehen sich wie die Sonne von O über S nach W; man nennt die Sonnendrehung rechts, weil wir die Sonne immer im Süden sehen, also ihre östliche Aufgangsstelle links, ihre westliche Untergangsstelle rechts, sie geht also bei Tage von links nach rechts. Auch die Rechtsdrehung der Winde ist so zu verstehen, daß der Beobachter in die Richtung schaut, wohin die Luft fließt, daß also der Wind direkt seinen Rücken trifft; dann fließt nach kürzerer oder längerer Zeit mit allmäligen oder schroffen Uebergängen die Luft mehr oder weniger nach rechts, der Wind trifft mehr den linken Arm des Beobachters; herrscht z. B. N, so fließt die Luft nach Süden, der Beobachter muß nach Süden sehen und wird dann bald finden, daß die Luft nach dem rechts von ihm liegenden Südwest hinfließt, daß also der N in NO übergegangen ist; ebenso geht bei der Rechtsdrehung der O in SO, der S in SW, der W in NW u. s. w. über. Bei der Linksdrehung ist alles umgekehrt; sie findet für Orte statt, die links von der Zugstraße liegen (in Fig. 400 oberhalb des großen Pfeils), da auf dem Striche cd nach Buys-Ballots Windregel die Windpfeile zuerst SO, dann O, später NO und schließlich N und NW anzeigen; so geht in Alaska, Canada, Hudsonsbai, Island, Spitzbergen, Lappland der O durch N in W über. Jedoch kann auch in einer und derselben Gegend ein *Zurückdrehen* oder *Krimpen* des Windes stattfinden; wenn z. B. bei uns ein Minimum im Norden sich immer mehr verflacht und endlich verschwindet, dagegen ein neues das mittelländische Meer entlang zieht, so ist unsere Gegend links von der Zugstraße des letzteren, der Wind, welcher sich bisher von SO über S nach SW und W gedreht hatte, springt plötzlich nach O um und dreht sich dann über N nach W. — Das Verständniß der Winddrehung läßt sich auch ohne die Cyklonenform gewinnen, indem man nur die Lage des Min., die Ablenkung durch die Erde oder die Windregel benutzt. Taucht z. B. bei Irland, westlich von uns, eine Depression auf, so sollten wir O haben, der durch die Erdrotation SO wird; rückt nun das Min. auf die Nordsee, so haben wir nach der Windregel SW; geht das Min. bis nach Südrußland östlich von uns, so erhalten wir nach der Windregel NW, der Wind drehte sich also von O über S nach W.

Die deutsche Seewarte hat in den letzten Jahren die europäischen Min. eingehenden Forschungen unterzogen, welche, wie die theilweise schon angeführten Arbeiten van Bebbers u. Köppens beweisen, schöne Resultate erzielt haben, die zu der Vermuthung führen, daß auch die gewöhnlichen Depressionen, wie die Stürme auf dem Golfstrome entstehen. Zu den Resultaten gehört die Anzahl der Min. auf den 5 Zugstraßen nach den Jahreszeiten: Auf den Zugstraßen I—III ziehen die Minima großentheils im Winter, auf IV im Sommer und auf V im Frühling, was offenbar mit den Lenzfrösten zusammenhängt. Weiter sind im Sommer die Zugstraßen den Isothermen fast parallel, während sie dieselben im Winter unter etwa 45° schneiden, was mit der Lage der Zugstraßen, rechts den höheren Gradient und die höhere Temp., zusammenhängt, sowie mit der Höhenerstreckung der Cyklonen, deren Stärke bei wachsender Höhe rasch abnimmt. Nicht alle Minima folgen den Zugstraßen; man nennt diejenigen, welche andere Bahnen, gewöhnlich mit geringer Geschw. und Tiefe einschlagen, *erratische Minima*. Wenn die beiden auf das Min. wirkenden Elemente, Druck und Temp., gleich stark aber entgegengesetzt wirken, so wird das Min. *stationär*, nimmt manchmal die Gestalt einer den Isothermen und Isobaren sich anschmiegenden *Zuges niedrigen Luftdruckes* an und entsendet *Theilminima*, die in ganz ungewöhnlichen Bahnen, Druck und Temp. entsprechend fortschreiten. Köppen hat insbesondere die Kreuzungsstellen der Zugstraßen, die er *Strahlungsgebiete der Minima* nennt, ins Auge

gefaßt; in Fig. 401 sind sie als weiße Kreise a bis h dargestellt; sie scheinen bei der Entstehung der Min. mitzuwirken. Zunächst ist auffällig, daß sie an den Grenzen von Land und Meer und auf den Grenzen des Golfstromes liegen, ein Fingerzeig für die Entstehung der Min.; darauf deutet wieder, daß hier anlangende Min. für längere Zeit stationär, ja retrograd werden, daß Theilminima von ihnen ausgehen, daß die Bahnen der erratischen Min. gewöhnlich Verbindungslinien der Centralgebiete sind, und daß endlich stationäre Min. sich häufig in ihnen ausbilden oder befinden. So fallen die 3 subarktischen Strahlungsgebiete f, a und e′ in die Gegenden, wo nach Hoffmeyer die niedrigsten Luftdrucke auf der Erde herrschen, und wo deßhalb telegraphische Wetterstationen errichtet werden müßten, wenn die Wetterprognose Sicherheit gewinnen soll.

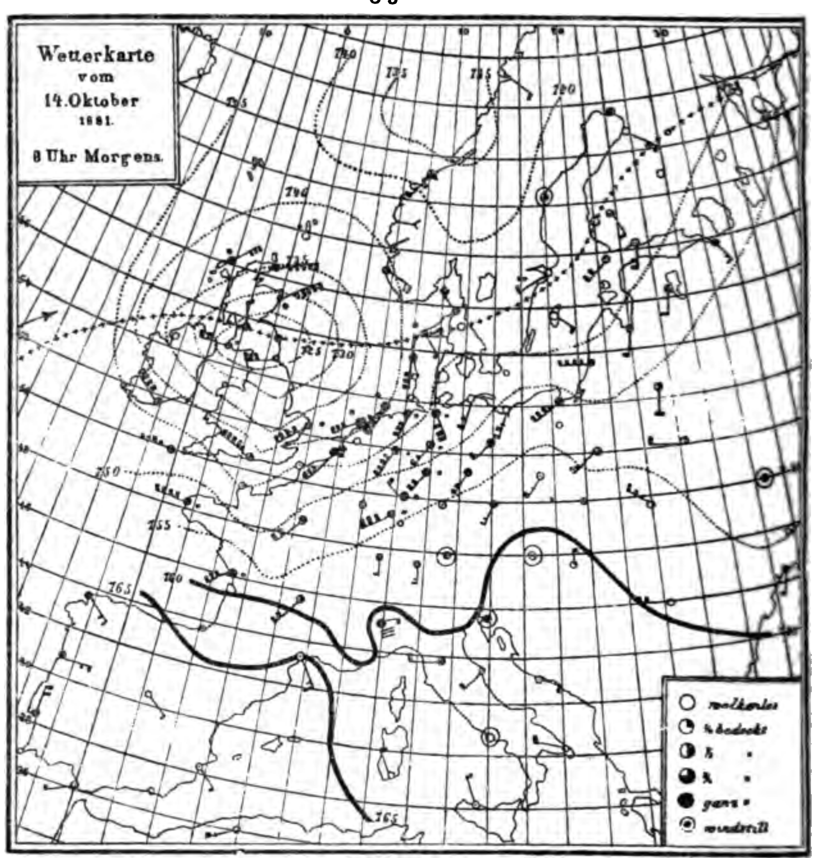
Nicht bloß die veränderlichen Winde, sondern auch die Stürme haben ihre Ursache in den wandernden Depressionen; denn alle Isobarenkarten von Sturmtagen zeigen die concentrischen Curven einer Cyklone und zwar da, wo der Sturm geherrscht hat, wie z. B. die Karte des Sturmes vom 18. Nov. 1864 (Fig. 388) oder van Bebbers 2 Wetterkarten vom 14. Okt. 1882 (Fig. 402/3); also sind alle Stürme Cyklonen oder Wirbelstürme mit großen Gradienten. Wegen der großen Geschw. der Luft ist auch die Ablenkung groß, die Sturmrichtung fällt mit der Isobarenrichtung zusammen, das Min. liegt immer ganz links von der Sturmrichtung; die große Centrifugalkraft in den inneren Theilen einer Cyklone vereinigt die Spiralströme zu einem Wirbelstrome. Im atlantischen Ocean beträgt die Zahl der jährlichen Stürme von und über der Beaufort'schen Stufe 8 in 35—60° Br. überall mehr als 150, wovon auf die Sommerzeit noch nicht 30 fallen, also weitaus die meisten im Winter stattfinden; viel geringer ist die Zahl in der tropischen Zone, am Aeq. gibt es keine Stürme und in 5—10° Br. durchschnittlich 2; die tropischen Stürme ersetzen die Zahl durch ihre ungeheure Gewalt und werden deßhalb speciell betrachtet. Die Entstehung der Stürme in höheren Breiten ist noch nicht bekannt; wahrscheinlich wirkt der Golfstrom mit, den die Seefahrer „Sturmkönig“ nennen.

Geht ein nordatlantischer Sturm mit seinem Centrum, dem Minimum, über einen Ort hinaus, so ist der Verlauf der Erscheinung stets der folgende: „Nach einer Periode schöner trockener und kalter Wintertage bedeckt sich der Himmel nach und nach, die Luft wird feuchter, die Temp. mildert sich plötzlich, der Wind dreht sich in die Südregion, und das Barometer fängt an zu fallen, anfänglich langsam, dann mit zunehmender Raschheit, 1, 2, 3mm per Stunde. Die Luft wird trüber, Regen beginnt zu fallen, wird stärker und stärker und breitet sich weit aus. Während dessen hat sich auch der Wind immer mehr verstärkt, weht aus SSO und SO, in welcher Richtung er am längsten verharrt; seine Geschw. erreicht 10, 15, 20m, bis bei 35m der Orkan seine höchste Wuth erreicht hat. Immer noch dauert der Regen fort und das Barometer fällt und fällt. Aber bald verzögert sich sein Sturz, der Wind verliert etwas von seiner Heftigkeit, während er in West übergeht; gleich darauf bricht er in furchtbaren Stößen aus, schleudert Blitze und Hagel und weicht plötzlich der Windstille, wobei das Barometer einen Sprung von 1 bis 2mm macht und der Himmel sich rasch aufklärt. Die eine Hälfte des Firmaments ist ganz Regen und Dunkelheit, — die andere heiteres, stilles Himmelblau. Wenn die Grenze der Wolkenschicht sich nach Osten entfernt, sieht der Beobachter, daß der ganze Aufruhr den tiefen Schichten der Atm. angehört, denn über der dünneren Wolkendecke ist die Luft ruhig und heiter, während unter ihr Sturm, Regen und Gewitter toben. Der unerfahrene Beobachter hält das Ungewitter für ausgetobt, denn der Himmel bleibt heiter, die Windstille dauert fort, das Barometer steigt. Aber bald fliegt aus NW ein Wolkenballen herbei, der „Cumulus“ der Meteorologen, der „Baumwollballen“ der Matrosen, andere Wolken von gleicher Form folgen ebenso rasch, und der Sturm tobt plötzlich mit erneuter Wuth aus NW; die zweite Phase des Sturmes bricht los, deren erste Stöße die schrecklichsten sind. Die Luft, die uns jetzt trifft, ist trocken und kalt, es regnet nicht mehr, zwischen den dicken weißen Wolken scheint der blaue Himmel durch; jedoch die Geschw. der Wolken nimmt nicht mehr zu, die Heftigkeit des Sturmes läßt allmälig nach, er wendet sich von NW zu NNW, das fortwährend gestiegene Barometer bleibt endlich stehen und der Sturm ist zu Ende.“ (Rysselberghe, les tempêtes d'Europe).

Dieser Verlauf des Sturmes erklärt sich durch die Eigenschaften der Cyclone in dem Mittelstriche, der durch den großen Pfeil (Fig. 400) bezeichnet ist; die Windrichtung ist auf der rechten Seite, die zuerst über den Beobachter hingeht, durchgängig südlich, bringt also warme, feuchte Luft, die das Steigen des Therm. und das Fallen des Barometers erklärt,

welch letzteres mit der Annäherung des Centrums immer stärker wird. Die aufsteigende feuchte warme Luft wird in der Höhe stark abgekühlt, wodurch die dicke dunkle Wolkenbank, Regen, Gewitter und Hagel entstehen. Die Windstille tritt ein, sowie das Centrum auf dem Orte angelangt ist und der kleine Sprung des Bar. zeigt, daß bewegte Luft einen niedrigeren Luftdruck erzeugt. Ist das Centrum über den Ort weg, so gelangt derselbe in die NW-Region, die herbeiströmende Luft ist kalt und trocken, kann nur wenig Wolken bilden, der Himmel ist klar, das Therm. sinkt, das Barometer steigt, bis die Cyclone ganz über den Ort hingegangen, der Sturm zu Ende ist. — Deutlich treten die Eigenschaften der Cyclonen aus Fig. 402 und 403 hervor, welche die Wetterkarte des gewaltigen Sturmes v. 14. Oct. 1881 darstellen. Zunächst ersieht man die unregelmäßigelliptische Gestalt, die Veränderlichkeit derselben und der Tiefe des Min.; auch das Zusammenfallen der großen Achse der Ellipse mit der Zugstraße, welche durch die gekreuzte Curve angegeben ist, fällt in die Augen, um 8 Uhr Morgens war sie westöstlich wie die Zugstraße, um 8 Uhr Abends nach Nordost gerichtet, und zwar wie es scheint früher als diese. Während zur ersten Zeit das

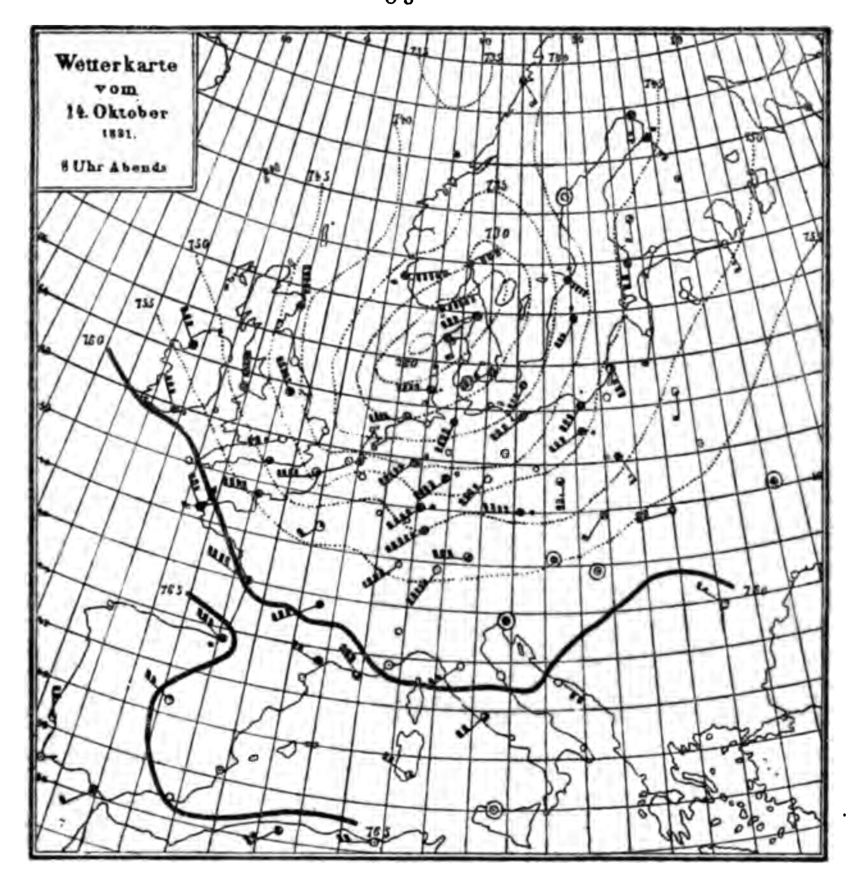
Fig. 402.



Min. über Schottland lag und 725mm betrug, lag es zur letzteren Zeit über Nordjütland und hatte sich bis 720mm vertieft. Von hier bis zu den Pyrenäen stieg der Luftdruck auf 765mm, die um je 5mm verschiedenen Isobaren waren nach Westen, Süden und Osten zu dicht gedrängt und rückten sich noch näher; daher starker und an Heftigkeit zunehmender Sturm über dem größten Theile Europas, wie die 4- und 5fach befiederten Sturmpfeile zeigen. Leicht ist aus diesen zu ersehen, daß die Sturmrichtung beinahe mit der Isobarenrichtung zusammenfiel; im Osten des Min. herrschte SO- und S-Sturm, im Süden SW und W, im Westen NW, N, ja NO. Die schwarzen Flecke neben den Stationen und die schwarz

ausgefüllten Stationskreise lassen erkennen, daß östl. und südl. vom Min. starker Regen fiel oder der Himmel wenigstens ganz bedeckt war: in diese Region der Cyclone nämlich, wo der warme feuchte S vorherrscht, gelangt die Luft rasch aus südl. Gegenden in nördliche, aus wärmeren in kältere, wodurch ihr Wasserdampf sich condensirt, was durch den Ascensionsstrom noch verstärkt wird; deßhalb ist der östl. und südl. Theil der Depression mit einer tief herabgehenden dicken, schwarzen Wolkenbank bedeckt, welche Gewitter und starke Regenmassen entladet; die freiwerdende Dampfwärme derselben trägt nicht wenig zur Erhöhung der Temp. bei. Im Westen und Norden der Cycl. fehlen die schwarzen Flecke und die Stationskreise sind nur viertels oder halb geschwärzt, der Regen fehlte also hier und der Himmel war nur theilweise bedeckt: in diese Regionen, wo der kalte, trockene N vorherrscht, weht die Luft aus kälteren Gegenden in wärmere und wird hierdurch noch trockener; deß-

Fig. 403.

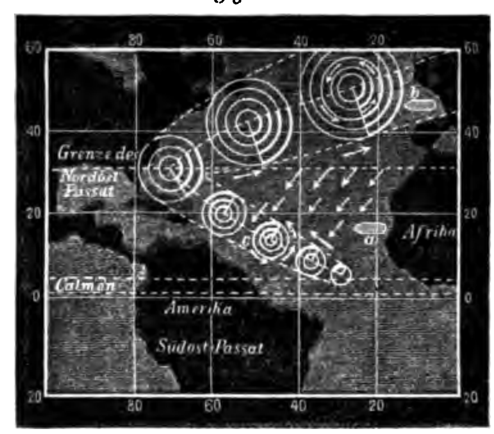


halb ist in der nördl. und westl. Cycl. der Himmel klar, und nur durch die Ascension entstehen Cumuli, Wolkenballen, die pfeilschnell im NW jagen und bei starker Ascension den ganzen Himmel bedecken; in Edinburg entstand während NW eine solche Dunkelheit, daß die Gaslaternen angesteckt wurden. Leicht ersieht man auch das rasche Fallen des Barometers für einen Ort, über den der östl. Theil der Cycl. geht, und das ebenso rasche Steigen, wenn auch der westl. Theil wie gewöhnlich darüber zieht; in Shields fiel das Barometer Morgens um 30mm und stieg bis Abends um denselben Betrag, während das Therm. Morgens um 10° stieg und Nachmittags ebenso stark fiel. Von Morgens bis Abends hatte das Min. mehr als 100 M. zurückgelegt; bei seiner bald erfolgenden Verflachung bewegte es sich langsamer und verschwand erst am 19. Oct. im weißen Meere; wegen der Verflachung herrschte schon am 16. über ganz Westeuropa wieder ruhiges, klares Wetter.

Die **tropischen Cyklonen** haben ein viel niedrigeres Minimum als die nordatlantischen und die Zunahme nach außen ist viel stärker; in Folge dessen ist der Durchmesser der tropischen Wirbelstürme kleiner; aber die Gradienten sind weit größer, und daher ist die Geschw. der Kreisluftströme sehr groß und die verwüstende Gewalt des Sturmes wahrhaft furchtbar. Im Gegensatze hierzu geschieht das Fortschreiten langsamer, höchstens 50 M. täglich. Auch ist die Windstille im Centrum viel entschiedener und vermehrt die Unheimlichkeit der entsetzlichen Erscheinung. Endlich sind die Sturmbahnen in der Richtung verschieden; die westindischen Stürme oder Hurricanes ziehen zuerst nach Nordwesten, dann nach Nordosten und manchmal schließlich nach Südosten.

Die Bahn der westindischen Cyklonen ist in Fig. 405 dargestellt; sie entstehen gewöhnlich nahe an der Region der Calmen, in der Gegend des ruhigsten NO-Passats, ziehen durch das atl. Meer nordwestlich bis an oder in die Vereinigten Staaten; an der nördl. Grenze des NO wenden sie sich nach Nordost, ziehen über Britannien in die Nordsee, wo sie auch manchmal nach Südost umbiegen und immer weiter werdend im Innern Rußlands sich verlieren. Die Drehstürme des chinesischen Meeres (Teifune) wandern von Ost nach West, die des bengalischen Meerbusens von Südost nach Nordwest; beide entstehen in der Zeit zwischen den zwei Monsunen; die südindischen haben ebenfalls eine Bahnbiegung. Das Min. des Luftdruckes in den trop. Cykl. geht bis zu 70cm herab und in 60 M. Entf. kann schon der gewöhnliche Luftdruck von 76cm herrschen; so entstehen Gradienten von 1mm per M. und die größten Sturmgeschwindigkeiten; ein Anemometer zu Washington gab bei einem Sturm eine Geschw. von 80m an. Hierdurch ist die furchtbare Wirkung dieser Stürme erklärlich, daß sie Städte in einem Augenblick in Schutthaufen verwandeln, Schiffe im Hafen durch Aneinanderschleudern wie Nußschalen zerbrechen, Wälder ausreißen und Gras abmähen; bei einer durch die Cyklone von Backergunge am 31. Oct. 1876 verursachten Sturmfluth gingen 200 000 Menschen zu Grunde. Natürlich ist in jenen feuchtheißen Gegenden die Condensation des aufsteigenden Wasserdampfes sehr reichlich, die Wolkendecke ist undurchdringlich schwarz, unaufhörlich von Blitzen durchzuckt, der Donner und das Brausen des Sturmes erfüllen die Luft und der Regen strömt in gewaltigen Güssen hernieder. Dem Seefahrer ist ein tropischer Wirbelsturm die größte Gefahr; aber die Kenntniß der Bahn ermöglicht ihm das Entweichen, ja der Segelschiffer benutzt sogar solche Stellen der Cyklone, die seinem Curse passen, für eine schnellere Fahrt, wie das Schiff a (Fig. 404), wenn es die nördl. Theile des Wirbels benutzt, rascher nach Westen gelangt; das Schiff b aber muß schleunigst aus dem Curs der Cyklone zu entweichen suchen; denn es nähert sich dem sogenannten **gefährlichen Viertel** (in der Fig. dick ausgezogen) des Wirbels, wo es durch die Windrichtung in das Centrum gerissen wird und durch die plötzlichen Richtungsänderungen und die größte Sturmstärke dem Untergange anheimfällt. Die Entstehung und oft über eine Woche dauernde Erhaltung der tropischen Cyklonen ist noch ebenso unerklärt wie die der nordatlantischen Wirbelstürme; früher gegebene Erklärungen mußten gewichtigen Einwänden weichen und die neueren bekämpfen sich noch gegenseitig.

Fig. 404.



Nicht blos die Stürme und veränderlichen Winde haben ihren Grund in den Cyklonen, sondern noch manche andere Wetterphänomene; so sollen viele Gewitter kleine Wirbelstürme sein. Den Cyklonen verwandt sind die **Tornados** in Nordamerika und die überall vorkommenden **Wettersäulen**, die in Wind- und Wasserhosen unterschieden werden; bei diesen Gebilden ist die Höhe bedeutend gegen den Durchmesser, bei den Cyklonen der Durchmesser gegen die Höhe, erstere sind mit Säulen, letztere mit Drehscheiben vergleichbar. Die Tornados sind Ascensionsströme, nach denen natürlich radial gerichtete Luftströme hingehen,

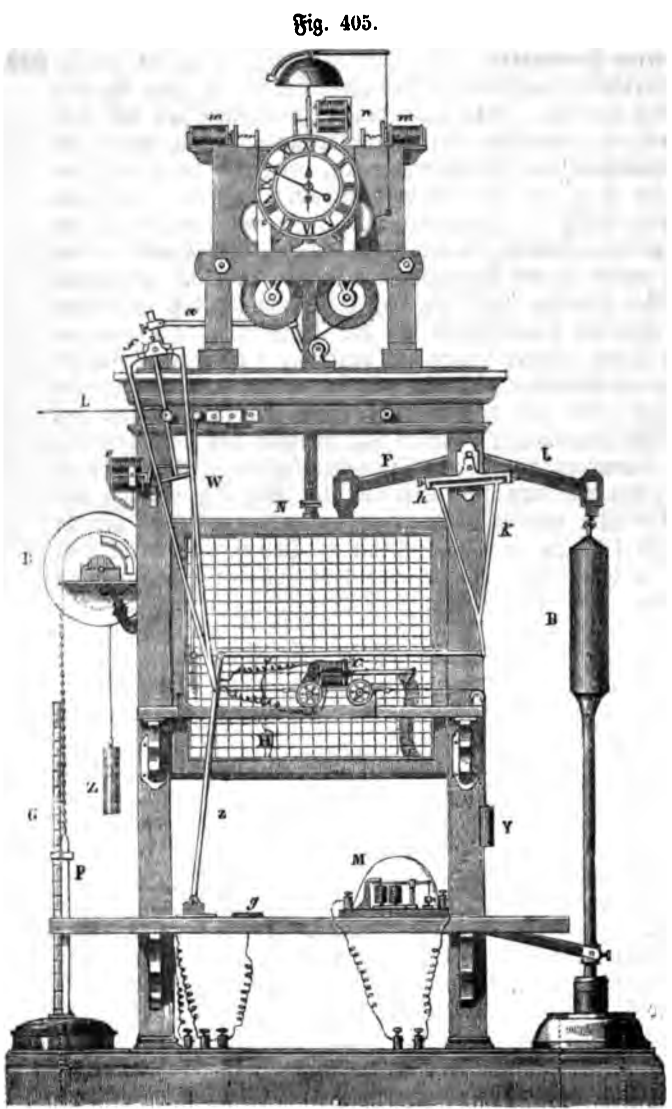
ohne jedoch in Wirbelbewegung zu gerathen; ihre Dm. sind Hunderte bis Tausende von m groß, ihre nordöstl. Bahnen bis 1200km lang; wegen der starken Luftverdünnung in ihrem Innern wirken sie so zerstörend wie tropische Cyklonen. Die Wind- und Wasserhosen sind noch dünnere Ascensionsströme (höchstens 60m Dm.) mit Wirbelbewegung; ihre luftverdünnte Mitte saugt und wirbelt Staub und andere Gegenstände ein, und Wasser, wenn sie über Wasser gehen, sowie auch das Wasser der Wolken, so daß sie manchmal zu Wassersäulen werden.

5. Der Wasserdampf der Luft, die wässerigen Meteore.

Absolute und relative Feuchtigkeit. Die Luft ist feucht, d. h. sie enthält 609 Wasserdampf, der als farbloses, durchsichtiges Gas unsichtbar ist, ja sogar der Luft besondere Durchsichtigkeit verleiht. Man mißt den Wasserdampfgehalt der Luft durch den Dunstdruck, d. i. die Höhe der Quecksilbersäule in mm, welche der Spannung des Wasserdampfes das Gleichgewicht hält, oder auch durch das Gewicht des Wasserdampfes in g, der in 1cbm Luft enthalten ist. Für gesättigten Dampf ist nach Daltons Gesetz die Spannung und Dichte des Dampfes in der Luft ebenso groß als im leeren Raume; demnach hat der gesättigte Dampf in der Luft die Spannungen, welche in den Spannungstabellen (z. B. 414.) zusammengestellt sind. Aus diesen Tabellen ergibt sich, daß die Spannung des gesättigten Wasserdampfes, also auch der Dampfgehalt mit der Temp. steigt und zwar in höherem Maße als die Temp. Dasselbe zeigt noch deutlicher die zweite Messungsart. Die Dampfdichte des Wasserdampfes ist bekantlich 0,625, d. i. ein gewisses Vol. Wasserdampf wiegt 0,625 von dem Gewichte eines gleichen Vol. Luft von gleicher Temp. und gleicher Spannung; berechnet man hiernach das Dampfgewicht, so ergeben sich für das Dampfgewicht von 1cbm fast genau soviele g, als die Spannung in mm beträgt; demnach kann 1ccm Luft von 20° eine Dampfmenge von 17g aufnehmen, bei 10° aber nur 9g, während 1cbm Luft von 0° schon mit 5g Dampf gesättigt ist und 1cbm Luft von —10° mit 2g Dampf. Wäre die Luft immer dampfgesättigt, so könnte man ihren Dampfgehalt aus den Tabellen direct neben der Temp. ablesen. Die Luft ist aber meist nicht dampfgesättigt; die absolute Feuchtigkeit ist der wirklich in der Luft vorhandene Dampf; die relative Feuchtigkeit ist die Zahl, welche angibt, wie viele Procente die absolute Feuchtigkeit von der gesättigten Dampfmenge beträgt. Bei 10° ist die gesättigte Dampfmenge 9; ist nun die absolute Feuchtigkeit bei dieser Temp. $4\frac{1}{2}$, so ist die relative Feuchtigkeit = 50. Wenn die relative Feuchtigkeit 100 beträgt, so ist die Luft dampfgesättigt; beträgt die relative Feuchtigkeit nahe an 100, so ist die Luft stark feucht; wird die relative Feuchtigkeit durch eine kleine Zahl ausgedrückt, so nennt man die Luft wenig feucht oder trocken, weil sie noch viel Wasserdampf aufnehmen also trocknend wirken kann. Mit derselben Dampfmenge kann heiße Luft trocken und kalte Luft stark feucht oder gesättigt sein; z. B. 10° warme Luft ist mit 9g gesättigt, also mit 8g stark feucht; 20° warme Luft ist mit demselben Dampfgehalte trocken, da sie noch einmal soviel Dampf aufnehmen kann. Demnach kann warme trockene Luft durch Abkühlung feucht oder sogar gesättigt werden. Der Thaupunkt ist die Temp., bei welcher die Luft mit ihrem augenblicklichen Dampfgehalte gesättigt ist; er heißt so, weil bei der geringsten weiteren Abkühlung die Luft einen Theil ihres Wasserdampfes niederschlägt, Thau bildet. Ist die Luft dampfgesättigt, so ist ihr Thaupunkt gleich ihrer augenblicklichen Temp.; ist sie sehr trocken, so liegt ihr Thaupunkt tief unter ihrer Temp.; daher gibt der Thaupunkt ein Urtheil über die relative Feuchtigkeit, wozu man Daniells Hygrometer benutzt; doch muß mit diesem Apparat für jede Bestimmung ein Versuch angestellt werden, während an Augusts Psychrometer die Daten zur Bestimmung der relativen und der absoluten Feuchtigkeit direct abgelesen werden können.

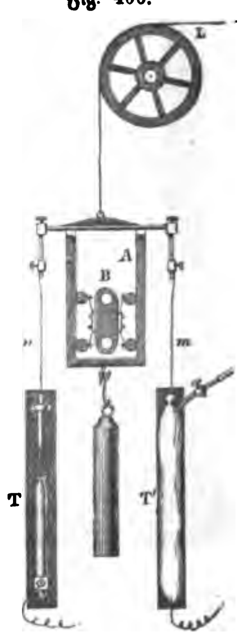
Daniells Hygrometer (1820) besteht aus 2 Glaskugeln, die durch eine 2mal rechtwinkelig umgebogene Glasröhre verbunden sind; die eine Kugel ist theilweise mit Aether gefüllt, mit einer Goldzone umzogen und enthält die Kugel des den Thaupunkt angebenden Therm., während die andere Kugel mit Musselin umwunden ist; das Gestell trägt ein zweites Therm. zum Ablesen der Lufttemp. Auf den Musselin wird nun Aether geträufelt, durch dessen rasche Verdunstung die in der Kugel befindlichen Aetherdämpfe condensirt und dadurch der Aether in der vergoldeten Kugel zu rascher Verdampfung veranlaßt wird, was diese abkühlt. Ist sie bis zum Thaupunkt abgekühlt, so schlagen sich auf ihr Dämpfe nieder, was an der Trübung der Goldzone erkannt wird; das innere Therm. gibt also den Thaupunkt an. Mit diesem und der Temp. der äußeren Luft geht man an die Tab. 414.; neben dem Thaupunkte steht die abs. Feuchtigkeit, neben der Lufttemp. die Menge des gesättigten Dampfes; das Verhältniß beider gibt die rel. F. — Das Psychrometer von August (1525) besteht aus 2 ganz gleichen Therm., von denen das eine durch ein seine Kugel umhüllendes Gewebe feucht erhalten wird. Je trockener die Luft ist, desto mehr verdunstet von dieser Feuchtigkeit und erniedrigt das Therm., während das andere die Temp. der Luft angibt. Aus den beiden Temp. und ihrer Differenz läßt sich die abs. und rel. F. aus Tabellen ablesen. Für ein ungefähres Urtheil reicht schon ein Blick auf die beiden Therm. hin; je größer ihr Unterschied im Verhältnisse zur Lufttemp. ist, desto trockener ist die Luft. Auch bei den selbstregistrirenden Feuchtigkeitsmessern (Psychrographen) ist das August'sche Psychrometer meist in Anwendung, z. B. bei Secchis Psychrograph (Fig. 405/6), der eine gerade Strecke aufzeichnet als Maß der Differenz des feuchten und des trocknen Therm. T′ und T (Fig. 406). Alle Viertelstunden drückt eine excentrische Scheibe des Uhrwerks auf dem Kopfe der Masch. (Fig. 405) auf die Stange a und schiebt dadurch den großen dreiseitigen Hebel W nach links; hierdurch geht auch der Faden L nach links und senkt so den Rahmen AB (Fig) 406)

Fig. 405.



mit seinen 2 Platindrähten m und n in das Queckſ. der beiden oben offenen Therm. Durch diese Linksbewegung wird auch der Wagen x (Fig. 405) nach links gezogen sammt einem auf ihm befindlichen Morse'schen Telegraphen, dessen Stift indessen gewöhnlich das Papier nicht berührt. Der Draht des Hufeisens kommt aber nicht direct von der Batterie, sondern geht vorher über den Anker und den Schraubenstift des Relais M und nachher in die Kugel des trockenen Therm. T, während der neg. Poldraht mit dem Platindrahte n dieses Therm. verbunden ist, so daß beim Eintauchen von n der Strom geschlossen wird. Der pos. Poldraht einer 2. Batterie geht an das Hufeisen des Relais M und von da in die Kugel des nassen Therm. T′, während der neg. Poldraht mit dem Platindraht m verbunden ist. Da das Queckſ. hier tiefer steht, so taucht m später ein als n, der 1. Strom wird eher geschlossen als der 2. Bei dieser 1. Schließung wird der Morse in Gang gesetzt und drückt seinen Stift auf das Papier, während der Wagen x nach links geht, zeichnet also eine wagrechte Linie auf, die beim Eintauchen in das nasse Therm. endigt; denn hierdurch wird der Strom des Relais geschlossen, der Anker desselben von dem Stifte abgezogen und so der 1. Strom geöffnet. — Auch die Fähigkeit hygroskopischer org. Substanzen wie Menschenhaare, Fischbein, Darmsaiten, Geraniumgrannen u. s. w., durch Aufsaugen von Feuchtigkeit sich zu verlängern und beim Trocknen zu verkürzen, ihre Windungen auf- oder zusammenzurollen, ist zu Hygrometern, ja sogar zu Wetterpropheten verwendet worden. Saussüres Haarhygrometer (1783) besteht aus einem oben befestigten Menschenhaare, das unten um eine leicht drehbare Rolle geschlungen und durch ein kleines Gewicht gespannt ist, wodurch es die Rolle und einen mit derselben verbundenen Skalenzeiger dreht. Die Wetterprophezeihungen von Klinkerfues beruhten auf dessen Bifilarhygrometer (1875), auf dem die rel. F. und der Thaupunkt direct abgelesen werden können. Auch das Procenthygrometer mit Justirvorrichtung von C. Koppe (1878) gibt direct die rel. F. in Procenten durch die Stellung des Zeigers an der Skala (Fig. 407) an; dasselbe wird von competenter Seite als bewährt empfohlen und zwar besonders neben dem Psychrometer zu gegenseitiger Correctur; es zeigt, wann das Psychrometer durch Kälte, Staub u. drgl. falsche Angaben macht, und hat an dem frisch hergestellten Psychrometer ein Kennzeichen der Richtigkeit. Es besteht aus einem besonders präparirten Menschenhaar, das oben an einer Achse befestigt ist, dann senkrecht herab geht und unten um die zeigertragende Rolle geschlungen ist; während es nun bei Saussüre u. A. durch ein Gewichtchen gespannt wird, geschieht dies hier durch eine kleine Feder aus hartem Neusilberdraht. Beim Trocknen verkürzt sich das Haar und dreht den Zeiger nach links, durch Befeuchten verlängert es sich, und das Federchen dreht den Zeiger nach rechts; bei voller Dampfsättigung muß dieser auf 100 zeigen. Darauf beruht die Justirvorrichtung: ein mit Musselin überzogenes Rähmchen wird mit Wasser getränkt und auf der Rückseite des App. in eine Nuth eingeschoben. Wird derselbe nun hinten durch den Schieber und vorn durch die Glasscheibe geschlossen, so sättigt er sich rasch mit Dampf und der Zeiger rückt auf 100. Geschieht dies nicht, so steckt man den beigegebenen Uhrschlüssel auf die Achse und führt durch Drehen den Zeiger an die Zahl 100.

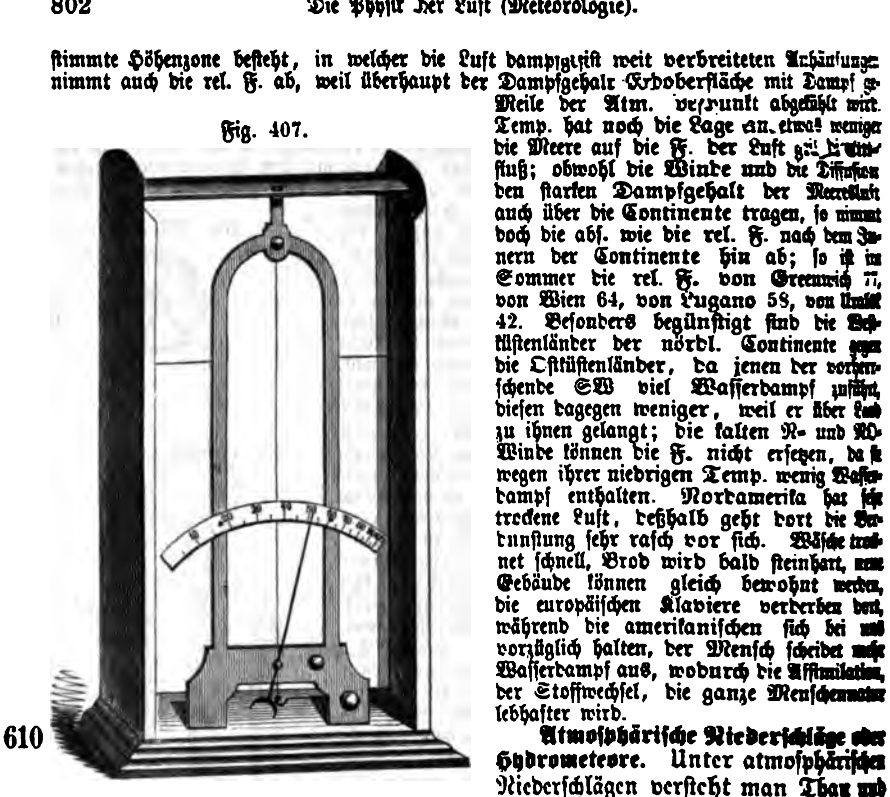
Fig. 406.



Die hygrometrischen Untersuchungen haben als allgemein, jedoch nur annähernd geltend folgende Regel ergeben: Wie nach Zeit und Ort die Temp. steigt, so steigt auch die absolute Feuchtigkeit, während die relative Feuchtigkeit abnimmt. So ist in Wien im Juli Morgens 6 ein tägl. Min. der abs. F., Abends ein Max., im Jahre ist das Min. im Januar, das Max. im August; die rel. F. hat ihr tägl. Min. Mittags um 3, ihr Max. Morgens 3; im Jahre ist das Min. im Juli, das Max. im Januar. Es ist dies leicht erklärlich: mit der Temp. wächst die Verdunstung, steigt also die abs. F.; aber noch stärker steigt mit der Temp. die Aufnahmefähigkeit der Luft, die Spannung des gesättigten Dampfes, wodurch das Verhältniß der abs. F. zu dieser Aufnahmefähigkeit, nämlich die rel. F. abnimmt. Analog ist die abs. F. in den Tropen am größten, in den polaren Gegenden am kleinsten, während die rel. F. durchschnittlich in höheren Breiten größer ist als in niederen. Auch in der Richtung nach der Höhe gilt die Regel; am Boden ist die abs. F. am größten und nimmt nach oben stark ab; die rel. F. nimmt dagegen nach oben zu, so daß eine be-

stimmte Höhenzone besteht, in welcher die Luft dampfgesättigt weit verbreiteten Anhäufung nimmt auch die rel. F. ab, weil überhaupt der Dampfgehalt Erdoberfläche mit Dampf ge- Meile der Atm. ... abgekühlt wird. Temp. hat noch die Lage an. etwas weniger die Meere auf die F. der Luft ... Ein- fluß; obwohl die Winde und die Diffusion den starken Dampfgehalt der Meeresluft auch über die Continente tragen, so nimmt doch die abs. wie die rel. F. nach dem Innern der Continente hin ab; so ist im Sommer die rel. F. von Greenwich 77, von Wien 64, von Lugano 58, von Irkutsk 42. Besonders begünstigt sind die Westküstenländer der nördl. Continente gegen die Ostküstenländer, da jenen der vorherrschende SW viel Wasserdampf zuführt, diesen dagegen weniger, weil er über Land zu ihnen gelangt; die kalten N- und NO-Winde können die F. nicht ersetzen, da sie wegen ihrer niedrigen Temp. wenig Wasserdampf enthalten. Nordamerika hat sehr trockene Luft, deßhalb geht dort die Verdunstung sehr rasch vor sich. Wäsche trocknet schnell, Brod wird bald steinhart, neue Gebäude können gleich bewohnt werden, die europäischen Klaviere verderben dort, während die amerikanischen sich bei uns vorzüglich halten, der Mensch scheidet mehr Wasserdampf aus, wodurch die Assimilation, der Stoffwechsel, die ganze Menschennatur lebhafter wird.

Fig. 407.



610 **Atmosphärische Niederschläge oder Hydrometeore.** Unter atmosphärischen Niederschlägen versteht man Thau und Reif, Nebel und Wolken, Regen und Schnee; diese Hydrometeore entstehen, wenn die Luft unter ihren Thaupunkt abgekühlt wird; sie enthält dann mehr Wasser, als sie bei der herrschenden Temp. in Dampfform fassen kann, wodurch der Ueberschuß condensirt, in flüssiger oder fester Form niedergeschlagen wird. Die Abkühlung der Luft geschieht hauptsächlich auf drei Arten: 1. Durch Berührung kalter Körper. 2. Durch Vermischung von Luftmassen verschiedener Temp. 3. Durch den aufsteigenden Luftstrom.

Die Condensation der ersten Art zeigt uns jeder glatte kalte Gegenstand, der im Winter in ein warmes Zimmer gebracht wird und sich mit einer Wasserhaut beschlägt, besonders die beschlagenen Fensterscheiben in feuchten Schulzimmern, sowie das Anhauchen trockener Scheiben. Ein Beispiel der zweiten Art bildet das Hauchwölkchen vor unserem Munde bei kalter Witterung; die dampfreiche ausgeathmete Luft wird unter ihren Thaupunkt abgekühlt und schlägt den Dampfüberschuß in feinsten Wassertheilchen nieder. Indessen kann auch bei der Mischung zweier wenig gesättigten Luftmassen eine Condensation stattfinden, weil der Dampfgehalt stärker zunimmt als die Temp., weßhalb der Dampfgehalt bei der Mitteltemp. geringer ist als der mittlere Dampfgehalt der beiden Luftmassen, was durch folgendes Zahlenbeispiel am deutlichsten wird. Wird 1^{cbm} dampfgesättigte Luft von 0°, also mit 5^g, gemischt mit 1^{cbm} Luft von 20°, die mit 17^g gesättigt ist, so entstehen 2^{cbm} Luft von 10° mit 22^g Dampf, so daß jedes cbm 11^g enthält; nun kann aber 1^{cbm} Luft von 10° nur 9^g Dampf fassen, also müßten 2^g Dampf condensirt werden. Wenn also zwei gesättigte, d. i. noch völlig klare Luftmassen gemengt werden, so scheidet sich ein Theil ihres Wasserdampfes als Nebelwölkchen aus. Da jene gesättigten Massen 2^g Dampf niederschlagen, so können auch ungesättigte Massen bei ihrer Mengung eine allerdings geringere Cond. bewirken. Jedoch muß dabei beachtet werden, daß durch die Cond. die Dampfwärme frei wird, wodurch die Temp. des Gemenges etwas steigt und dessen Aufnahmefähigkeit etwas erhöht wird; so wird in obigem Falle die condensirte Dampfmenge etwa 1^g betragen und daher bei der Mischung ungesättigter Luftmassen ein noch geringerer oder gar kein Niederschlag entstehen.

krone auf dieser aufsteigenden Luft den aufsteigenden Luftstrom bietet schon der Schwaden sich öfter Nachmittags und ...se ein Beispiel; jedoch findet im Freien die Cond. in einem gethürmt machen sie ... blos durch das Aufsteigen in kühlere Räume statt, sondern auch durch erheben, wie ... welche hoch aufsteigende Luft durch ihre Verdünnung erfährt. Die mechanische und ...metheorie berechnet, daß trockne Luft sich für je 100m Erhebung um 1° abkühlt; beim Aufsteigen feuchter Luft wird nun allerdings durch Cond. Dampfwärme frei, wodurch z. B. gesättigte Luft von 15° sich nur um ½° abkühlt, wenn sie um 100m gestiegen ist; aber dennoch ist auch diese verminderte Abkühlung so beträchtlich, daß sie eine starke Cond. bewirken muß. Steigt z. B. gesättigte Luft von 25°, die in 1cbm 23g Dampf enthält, um 1200m auf, so beträgt ihre Abkühlung 5°, ihre Temp. sinkt auf 20°, ihre Sättigung auf 17g; also muß 1cbm Luft 6g Dampf niederschlagen, was schon eine ganz beträchtliche Regenmenge ergeben würde. Nun ist aber das Aufsteigen von feuchtwarmer Luft einer der gewöhnlichsten Vorgänge in der Atm., geschieht in den tropischen Gegenden fast täglich und in allen anderen an jedem warmen Tage; außerdem tritt es auch ein, wenn ein Wind ein Gebirge überschreitet, ja wenn er nur von tieferen nach höheren Gegenden, vom Meere zu ansteigendem Lande weht. In den 3 Ursachen der Abkühlung liegt also Veranlassung genug zur Cond. des Wasserdampfes der Luft, zu Niederschlägen, Hydrometeoren.

1. Thau und Reif. In klaren Nächten ist die Ausstrahlung der Bodengegenstände nach dem kalten Weltraume so stark, daß die Temp. benachbarter feuchter Luft unter ihren Thaupunkt sinken kann, wodurch ein Niederschlag auf den Gegenständen entsteht; bleibt die Temp. über Null, so geschieht der Niederschlag in Tropfenform: Thau; sinkt die Temp. unter Null, so findet der Niederschlag in Eiskryställchen statt: Reif. 611

Eine Wolkendecke verhindert die Thaubildung, weil sie die Ausstrahlung nach dem kalten Weltraume nicht zuläßt; ebenso thaut es nicht unter belaubten Bäumen und anderen Gegenständen. Unter sonst gleichen Umständen bethauen verschiedene Gegenstände um so reichlicher, je stärker ihre Ausstrahlung ist, also lockere, dunkle, schlecht leitende Körper mehr als glatte, helle, gut leitende, am meisten Gras und Laub, am wenigsten Metalle. In trockener Luft ist der Thau ganz unmöglich, kommt also in den Wüsten und Steppen der großen Continente nicht vor; an heißen Tagen und in heißen, feuchten Gegenden kann die Luft sehr dampfreich sein; deßhalb ist der Thau im Hochsommer und in tropischen Gegenden in der Meeresnähe am stärksten, ersetzt z. B. in Peru fast den mangelnden Regen. Starker Wind verhindert die Thaubildung, weil die Luft an dem abgekühlten Boden vertrieben wird, ehe sie ihren Niederschlag begonnen hat; darum ist der Thau in windstillen Nächten am reichlichsten und kann in solchen sogar bei bedecktem Himmel eintreten, wie er umgekehrt unter einem sehr klaren Himmel bei schwachem Winde entstehen kann. Thau und Reif sind nicht mit Beschlag zu verwechseln, der bei der Berührung kalter Mauern mit warmer, feuchter Luft erscheint, bei milder Witterung als flüssiger, bei kalter als schneeiger oder eisiger Ueberzug auftritt; er entsteht nicht durch Ausstrahlung, ist also auch in den Folgen dieser von Thau und Reif abweichend; ebenso entsteht er am stärksten an guten Leitern, weil diese am kältesten sind, während Thau und Reif mehr an schlechten Leitern sich bilden. Aehnlich entsteht das Glatteis, wenn auf den winterkalten Boden Regen oder Nebelgeriesel herabfällt; doch kann auch kürzer dauerndes Glatteis auf wärmerem Boden entstehen, wenn dieser von Wassertröpfchen in unterkühltem Zustande getroffen wird. Vom Reif verschieden ist auch der Rauhfrost oder Rauchfrost, der sich bei eishaltigem rauchgrauem Nebel unter 0° an Bäumen und Sträuchern in solcher Masse ansetzt, daß diese manchmal unter seiner Last zerbrechen.

2. Nebel und Wolken. Nebel sind nahe, meist tief schwebende Wolken, und Wolken sind ferne, meist hochschwebende Nebel. Beide bestehen aus äußerst kleinen Wassertheilchen oder Wasserbläschen oder Eisnädelchen, die durch die Condensation des Wasserdampfes der Luft entstehen, und wegen ihres geringen Gewichtes im Vergleiche zu ihrer großen Oberfläche den verhältnißmäßig großen Luftwiderstand kaum überwinden können und deßhalb nur äußerst langsam sinken, ja jedem Luftzuge, selbst aufwärts, folgen. 612

Sehen wir auf einem Berggipfel eine Wolke hängen und steigen hinauf, so befinden wir uns im Nebel; vom Rigi aus sah ich einmal die nördliche Hälfte des Zuger Sees von Wolken bedeckt und ein Dampfschiff aus der Wolkenbank herausfahren; die heraufgekommenen Reisenden erzählten, in der ersten Hälfte ihrer Fahrt hätte der Nebel ihnen alle Hoffnung verdorben, in der Mitte sei er plötzlich verschwunden. Indessen pflegen wir doch vorzugsweise die hohen in bestimmte Massen gruppirten Anhäufungen von condensirten Wasser-

theilchen Wolken zu nennen und die tief schwebenden, meist weit verbreiteten Anhäufungen: Nebel. Dieselben entstehen, wenn die Luft in der Nähe der Erdoberfläche mit Dampf gesättigt ist, und diese dann durch Ausstrahlung noch unter den Thaupunkt abgekühlt wird. In den polaren Zonen kann die Sättigung, besonders über den Meeren an etwas wenigen kalten Tagen durch Verdunstung, oder auch durch Südwinde leicht eintreten, weil die kalte Luft nur einer geringen Dampfmenge bedarf; die geringste Abkühlung bewirkt dann weit verbreitete Nebel von sehr geringer Höhe, die meist aus Eisnädelchen bestehen und der Luft einen eigenen Glanz verleihen. Auch die Nebel der gemäßigten Zone entstehen aus gleichem Grunde hauptsächlich in den kühleren Jahreszeiten über wasserreichem Boden, Seen, Flüssen und Wäldern, sowie über meeresfeuchten Ländern wie England. Im Herbst ist die Sonnenwärme meist noch ausreichend, die durch ungehinderte nächtliche Ausstrahlung kalt gewordene Nebelluft bei Tage so zu erwärmen, daß die Wassertheilchen wieder verdampfen und den klaren Himmel über dem Nebel auch nach unten zu verbreiten; auf unsere Octoberregennebel folgen meist heitere Tage. Jedoch gibt es im Winter auch Nebel, die durch Berührung des feuchtwarmen SW mit dem kalten Boden entstehen und meist bald dem Regen weichen, der Nebel wird dichter, benetzt den Boden immer mehr, feine Wassertröpfchen fallen, die sich nach und nach vermehren und vergrößern und so den Regen bilden. Befindet man sich in einem dichten Bergnebel, der von unten als Wolke erscheint, so beobachtet man beim Herabgehen, wie die feinen Tröpfchen des Gerieſels immer mehr wachsen, der Nebelregen immer großtropfiger wird und unten in den gewöhnlichen Regen übergeht. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn die Luft unten ebenfalls gesättigt ist, dann regnet nicht blos die Wolke, sondern der ganze Raum zwischen Wolke und Erdboden; ist dieser Raum nicht gesättigt oder zu trocken, so können die fallenden Tropfen noch kleiner werden und sich gar ganz in Dampf auflösen; so sieht man wohl einmal eine ferne Wolke mit schief herabgehenden grauen Regenstreifen, die den Boden nicht erreichen. In ähnlicher Weise lösen sich die sinkenden oder vergewehten Wassertheilchen einer Wolke in der trocknen Luft, wodurch Wolken oft genug verschwinden. Und wenn eine Wolke lange Zeit an derselben Stelle zu stehen scheint, so bildet sie sich durch die Fortdauer ihrer Ursache immer neu, wodurch auch ihre Veränderlichkeit erklärlich ist; Dove vergleicht die Wolkenbildung mit dem Schaumwölkchen eines Baches oder einer Stromschnelle, das aus immer anderen Wassertheilchen entstehe und uns doch beständig scheine. In der kalten Jahreszeit und in bedeutender Höhe und polaren Gegenden noch immer bestehen die Wolken aus feinen Eisnadeln, wie z. B. die äußerst hohen weißen dünnen Wolken, die den blauen Himmel nach längerem schönen Wetter zuerst so überziehen, als ob (nach Goethe) der Himmel mit silbernen Besen gekehrt wäre; jedoch können andere Wolken bei niedriger Temp. auch aus unterkühlten Wassertheilchen zusammengesetzt sein, da sehr kleine Wassermengen z. B. in Capillarröhren sich tief unterkühlen lassen.

Man unterscheidet nach Howard (1802) drei Hauptformen der Wolken: 1. Cirrus oder Federwolke, feine, zarte, weiße Wolkenstreifen, oft parallel geradlinig, manchmal auch hin= und hergebogen, Meilen hoch am blauen Himmel, aus Eisnadeln bestehend. 2. Cumulus oder Haufwolke, dicke, rundliche Wolkenballen, unten wagrecht, oben traubig begrenzt, an Farbe vom tiefsten Dunkel bis zum glänzendsten Schneeweiß. 3. Stratus oder Schichtwolke, wagrechte, langgestreckte Wolkenschichten, an Farbe meist graublau. Zwischenformen sind: 1. Cirrocumulus, federige Haufwolke, hohe, weiße, kleine Wolkenbällchen, oft in vielen Reihen neben einander, Schäfchen. 2. Cirrostratus, federige Schichtwolke, dünne, schmale, wagrechte, mehr weiße Wolkenschichten. 3. Cumulostratus, zu dicken Schichten vereinigte Haufwolken. Alle Formen gehen bei steigender Anhäufung und Herabsenkung in eine allgemeine Wolkendecke des Himmels über, Nimbus oder Regenwolke, deren Höhe an Regentagen bis zu 600^m herabgeht, während Humboldt die durchschnittliche Wolkenhöhe auf 3000^m schätzt. Um die Stärke der Bewölkung kurz zu bezeichnen, denkt man sich alle Wolken zu einer vereinigt und gibt dann an, wie viel Zehntel des Himmels hierdurch bedeckt würden; so bezeichnet 10 ganz bedeckt, 5 halb bedeckt, 0 ganz klar.

Die Cirrusformen entstehen am heiteren Himmel, wenn eine Cyklone oder ein von derselben herrührender südl. Wind herannaht; die Seeleute nennen sie Katzenschwänze und die welligen, plötzlich endigenden Formen Windbäume; die Haufwolken heißen bei ihnen Baumwollballen; über jeder Insel schwebt häufig, in heißen Gegenden immer ein Cumulus, der das Land schon anzeigt, wenn es durch kein anderes Mittel zu entdecken ist; er entsteht durch den Ascensionsstrom, der sich über dem stärker erwärmten Lande bildet, als eine Schaum-

krone auf dieser aufsteigenden Luftsäule. Auch in unseren schönen Sommertagen bilden sie sich öfter Nachmittags und schwinden gegen Abend wieder; am fernen Horizont übereinander gethürmt machen sie den Eindruck von Schneegebirgen, die sich aus dunklen Schichtwolken erheben, wie überhaupt die Schichtwolke durch Zusammenfließen zahlreicher Haufwolken entsteht und den Regen oder Schnee bringt.

613 3. Der Regen und das Wetter. Regen entsteht durch fortdauernde starke Condensation, die durch Anhäufen und Vereinigen der Wolken angedeutet wird. Demnach ist die Menge, Häufigkeit und Dauer des Regens durch die Verhältnisse bedingt, die starke Condensation bewirken. Hierzu gehört vor Allem der Ascensionsstrom warmer feuchter Luft, der in der warmen Zone fast jeden Tag fortwährend und auch in der gemäßigten Zone in warmer Sommerzeit häufig eintritt; die Haufwolken vermehren und vergrößern sich und fließen bald zu dem schwarzen Nimbus zusammen. Die zweite Hauptursache ist das Ansteigen warmer feuchter Winde; überall entsteht leicht Regen, wo warme Winde von Meeren herwehen, über dem Lande und besonders an Gebirgen hinaufsteigen; an der Windseite der Gebirge ist der Regen reichlich; jenseits, auf der Leeseite, im Windschatten herrscht Trockenheit, weil die Luft durch das Ansteigen auf der Windseite ihren Wasserdampf verloren hat, und auf der Leeseite durch Herabsinken warm und dadurch noch trockener wird. Warme Winde sind gewöhnlich die in der Richtung vom Aequator nach den Polen hinwehenden Winde, die sogenannten Aequatorialströme, so unsere Süd- und Südwestwinde; diese bringen daher Regen, auch wenn sie nicht hoch ansteigen, weil sie durch Berührung mit der kalten Erde, durch ihr Wehen aus wärmeren in kältere Gegenden abgekühlt werden. Dagegen die Winde, welche von den Polen nach dem Aequator wehen, erzeugen Trockenheit, wenn sie über Länder herkommen, also wenig Wasserdampf enthalten; sie werden noch trockener, wenn sie aus kälteren in wärmere Gegenden wehen, weil sie durch ihre Erwärmung sich noch weiter von der Sättigung entfernen; zu diesen trockenen Polarströmen gehören unsere Nord-, Nordost- und Ostwinde. Sind die Polarströme warm und feucht und steigen auf, so erzeugen auch sie Regen, wie auch die feuchten, warmen Monsune, die gegen ein Gebirgland wehen. Um die Regenmenge verschiedener Gegenden zu vergleichen, mißt man sie durch Ombrometer, und gibt sie durch die Höhe in cm an, zu welcher aller Regen eines Jahres ansteigen würde, wenn derselbe unverändert beisammen bliebe. Die höchste Regenmenge fällt durchschnittlich in der Region der Calmen; sie nimmt nach den Polen zu ab. Doch gibt es Orte von großer Breite, die eine große Regenmenge haben; diese liegen dann immer auf der Windseite hoher Gebirge in Gegenden vorherrschender warmer, feuchter Winde.

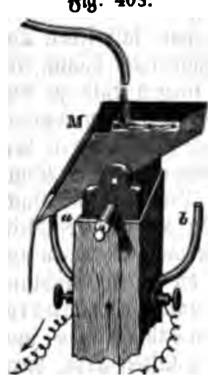
Während in der Gegend des Aeq. die durchschnittliche jährliche Regenhöhe 300cm beträgt, hat Deutschland nur durchschnittlich 60cm R. Viel höher noch als im Allgemeinen in den Calmen ist die Regenmenge in Ostindien, wo der feuchtwarme SW-Monsun an Hochgebirgen hinaufsteigt; so hat Cerra Punji die größte Regenhöhe von 1420cm. Den Einfluß der Gebirge auf den feuchtwarmen SW von Westeuropa zeigt Coimbra auf der Windseite der Sierra d'Estrella, wo 300cm R. fallen, während das Tajogebiet auf der Leeseite kaum 40cm R. hat; Bergen auf der Westseite der Kiölen hat 180, Upsala nur 50cm; Paderborn südwestl. vom Teutoburger Walde erhält jährlich 74, Salzuflen auf der Leeseite nur 58cm R. Mit der Entf. von den Weltmeeren nimmt die Regenmenge ab; Großbrittanien hat durchschnittlich 100, Holland 70, Deutschland 60, Rußland 40, Sibirien 30cm Regen.

Das Ombrometer besteht aus einem weiten cylindrischen Blechgefäße mit einem dünnen, gläsernen Wasserstandszeiger und einem genau gleichweiten Auffangegefäße, das oben auf das Blechgefäß luftdicht schließend eingesetzt wird und mit seinem trichterförmigen Boden den Regen in dieses einleitet, aber die Verdunstung hindert. Es gibt auch zahlreiche, selbstregistrirende, die Regenhöhe aufzeichnende Regenmesser, von denen wir nur die Einrichtung in Secchis Meteorograph (Fig. 386) erwähnen. Ein weiter Trichter fängt auf dem Dache den Regen auf und führt ihn in das engere Gefäß rechts am Fuße der Masch., wodurch ein Schwimmer auf dem Wasser in diesem Gefäße stark steigt, so daß man schon an der Skala G die Regenhöhe ablesen kann. Indessen wird sie auch aufgezeichnet; denn der Schwim-

mer hängt an einer über die Rolle R gehenden, durch ein Gegengewicht gespannten Kette, welche sonach beim Steigen des Schwimmers die Rolle dreht. Durch das Uhrwerk wird nun vom Mittelp. der Rolle nach dem Umfange hin ein Schreibstift geführt, der im Ruhezustande der Rolle eine gerade, radiale Linie auf über dieselbe gebreitetes Papier zeichnet, im bewegten Zustande aber eine krumme Linie, aus deren Länge die Regenhöhe zu erkennen ist. — Für die Aufzeichnung der Regendauer dient der **schwingende Nachen** (Fig. 409), der an einer Stelle des Daches angebracht ist, die rasch Regen sammelt, und welcher vermöge einer Aufbiegung des Bodens in dessen Mitte bald rechts bald links herabsinkt und dadurch bald bei a bald bei b einen el. Strom schließt, bald in der Mitte schwebend denselben öffnet, indem der eine Zuleitungsdraht zur Achse des Nachens geht. Ist der Strom geschlossen, so zieht das Hufeisen e (Fig. 386) einen Anker an und mittels der Stange q einen Hebel seitwärts, der einen Schreibstift trägt und daher einen kleinen Strich bei P auf die Tafel zeichnet; wenn der Strom durch das Schwingen des Nachens sich öffnet, so wird der Hebel durch eine Feder wieder zurückgezogen, um gleich nachher beim folgenden Stromschlusse einen gleichen Strich aufzuzeichnen; so entsteht die Strichsäule P, aus deren Länge die Regenzeit abgelesen wird.



Fig. 408.



Da Wind und Regen das Wetter bilden, so hat man die Erdoberfläche nach der Menge und Zeit des Regens in Regenzonen eingetheilt, die mit den Windzonen zusammenfallen, aber noch stärkeren Abweichungen als diese unterworfen sind. 1. **Die Zone des beständigen Regens**, 5° nördlich bis 5° südl. vom Aeq., ungefähr mit dem Calmengürtel zusammenfallend: es regnet jeden Tag durchschnittlich 9 St. lang, am stärksten zur Zeit des Zenitstandes der Sonne im März und Sept., am schwächsten zur Zeit der Solstitien, der größten Entf. der Sonne vom Zenit, im Juni und Dec. Die Nächte, Morgen und Abende sind wundervoll klar, bald nach Sonnenaufgang beginnt die mächtige Ascension, die aus dem stets feuchten Boden wie aus den warmen Meeren große Dampfmassen in die Höhe führt; dicke Haufwolken entstehen in rasch wachsender Zahl, verdunkeln bald den ganzen Himmel, der von gewaltigen Blitzen unaufhörlich erleuchtet wird, („ein feinhöriger Beobachter würde das Rollen des Donners ununterbrochen hören", Boussingault), der Regen stürzt nicht in Tropfen, sondern in dicken Fäden und Strahlen herab; gegen Abend ist das Gewitter zu Ende und heiterer Himmel herrscht wieder, „die Damen laden zum Thee nach dem Gewitter ein". Beide Seiten eines nordsüdl. ziehenden Gebirges sind gleich fruchtbar, keine Stelle entbehrt je der grünen Pflanzendecke, überall geschehen Grünen, Blühen und Reifen fortwährend und gleichzeitig, diese Zone ist die fruchtbarste Gegend der Erde, wo das Wetter, bei uns sprüchwörtlich das Veränderlichste auf Erden, jahraus jahrein sich niemals ändert. 2. **Die Zone der doppelten Regenzeit** von 5—15° Br.: Zu den Zeiten der zwei jährlichen Zenitstände der Sonne herrschen die stärksten Regen, die ;in der kurzen sommerlichen Zwischenzeit etwas schwächer werden, in der langen winterlichen Zwischenzeit herrscht halbjährliche Trockenheit, wo keine Wolke je den reinen Glanz des Himmels trübt. In den Zeiten der Zenitstände ist die Ascension hier so stark wie in den Calmen, der Passat wird schwach und sistirt kurze Zeit ganz; deßhalb ist hier dasselbe Wetter wie in der Calmenzone; nur sind die Gewitter hauptsächlich Nachmittags und erzeugen furchtbare Platzregen; außerdem treibt an nordsüdl. Gebirgszügen der Passat den Dampf nach der Windseite, weßhalb an diesen Ostseiten starke Regen und große Fruchtbarkeit zu Hause sind, während auf der Leeseite im Westen der Gebirge nur Savannen bestehen oder völlige Dürre. Die winterliche Trockenzeit entsteht durch das unaufhörliche Wehen des Passats, der aus kühleren in wärmere Gegenden zieht, ohne mit Ascensionsströmen gemischt zu sein, und daher völlig trocken ist. Wo er übers Meer herkommt, läßt er die Trockenheit sich nicht ausbilden, besonders wenn er an Gebirge anprallt z. B. in Madagascar. Eine Ausnahme tritt auch in den indischen Monsungebieten auf, wo zwar im Winter bei NO.-Passat die Trockenzeit waltet, aber im Sommer durch den SW-Monsun die doppelte Regenzeit in eine unaufhörliche verwandelt wird. Die Zone der doppelten Regenzeit ist am besten entwickelt im tropischen Süd- und Mittelamerika, wo man jedoch die Trockenzeit Sommer und die Regenzeit Winter nennt, sich also in der Benennung der Jahreszeiten nicht nach dem Sonnenstande richtet. 3. **Die Zone der einfachen Regenzeit** von 15—25° Br.: Zur Zeit des Zenitstandes der Sonne in dem zugehörigen Sommersolstitium sind an den Wendekreisen die Verhältnisse des Aeq., es entsteht eine kurze energische Regenzeit; wo noch die Meere mitwirken, kann die Regenmenge calmenartig groß werden; so hat Veracruz 300cm Regen. Im Innern der Continente aber ist der größte Theil des Jahres dem Passat preisgegeben, wodurch eine 9- bis 10monatliche

Trockenzeit entsteht, die in den vom Aeq. entfernteren Gebieten noch länger dauert, so daß diese schon der folgenden Zone angehören. 4. *Die regenlose Zone* ist nicht als Gürtel um die Erde herum entwickelt, sondern nur im Innern großer Continente oder ausgedehnter Länder, in Afrika zwischen 18 und 30° als Sahara, in der arabischen, syrischen und persischen Wüste; hier weht das ganze Jahr der trockene NO-Passat, der keinen Regen bringt und deßhalb die ewige Unfruchtbarkeit der Wüsten erzeugt. Viel weiter nördlich liegt in Mittelasien die Wüste Gobi von einem Gebirgswall umschlossen, der den überwehenden Winden alle Feuchtigkeit entzieht. Aehnlich erklärt sich die Wüste Kalahari in Südafrika und die große Salzseewüste zwischen der Sierra Nevada und dem Felsengebirge; auch östlich vom Felsengebirge, im Windschatten des vorherrschenden SW ist die wüstenartige Steppenbildung weit ausgebreitet. In Südamerika ist die Westküste regenlos, wo der SO-Passat weht, in Peru und Nordchile, weil dieselbe auf der Leeseite der Anden liegt; weiter nach Süden außerhalb des Passats tritt eine völlige Umkehrung ein, weil dort Westwinde vorherrschen, wodurch die Westküste regenreich und die Ostseite des Gebirges die Leeseite und hiermit wüstenartig wird. Auch in Neuholland ist das Innere wüstenartig, wo es dem Gebiete des SO-Passats angehört. 5. *Die subtropische Zone* von 28—40° Br.: im Sommer herrscht Trockenzeit, im Winter Regenzeit. Die sommerliche Trockenzeit erklärt man jetzt wie früher durch den vorherrschenden NO-Passat. Die winterliche Regenzeit hielt man früher für eine Folge davon, daß bei dem Zurückweichen des NO-Passats der hohe Antipassat, der auf der nördl. Halbkugel hoch oben wehende SW, durch seine Abkühlung und hierdurch vergrößerte Dichte herabkomme und durch Berührung mit der Erde abgekühlt seinen reichlichen Wasserdampf als Regen niederschlage. Im Winter finde dieses Niedersteigen in der Br. von Nordafrika und Sicilien statt, im Frühling und Herbst erst in Italien und Griechenland, im Hochsommer in Norddeutschland und Skandinavien, wodurch sich die Regenmaxima in diesen Gegenden zu den betreffenden Zeiten erklärten. Die neuere Meteorologie behauptet aber, das Herabkommen geschehe schon in 30° Br.; außerdem habe der Antipassat in der Höhe fast alle Feuchtigkeit verloren und müsse durch Herabsinken wie der Föhn wärmer und dadurch trocken werden; endlich sei auch die Erscheinung des Winterregens in der subtropischen Zone nicht so durchgängig und keinesfalls gürtelartig um die Erde verbreitet, wie es bei der Richtigkeit jener Erklärung stattfinden müsse. So haben die Vereinigten Staaten, die großentheils der subtropischen Zone angehören, im Winter keine Regenzeit, weil die herrschenden Winde SW und NO dort beide trocken sind; im Sommer haben sie auch keine Trockenzeit, weil dieses große Land im Sommer eine Wärmecalme bildet und daher von einem sehr dampfreichen S- und SO-Monsun überweht wird, der reichlichen Regen bringt; Newyork hat 120, Cincinnati 112, St. Louis 95 und New-Orleans 121^cm^ Regen. Aehnliche Verhältnisse herrschen in dieser Br. auf allen Ostseiten der Continente, in den Argentinischen Staaten, in Capland und Natal, in China und Japan selbst bis zu 50°; überall bringt ein S- und SO-Monsun reichlichen Sommerregen und große Fruchtbarkeit. Eigentlich subtropisch sind nur die Meere und die Westküstenländer z. B. das ganze Gebiet der Mittelmeerländer bis nach Persien hinein; wie Aegypten, das mehr der regenlosen Zone angehört, durch den Nil den Regen ersetzt, so hatten die anderen Culturstaaten des Alterthums künstliche Bewässerungseinrichtungeu, die den reichlichen Winterregenfall für den trockenen Sommer erhielten, wozu vor Allem die allgemeine Bewaldung gehörte; die Ausrodung der Wälder und die Vernachlässigung der Bewässerung haben die ehemals üppige Fruchtbarkeit und den sprüchwörtlichen Reichthum jener Gegend großentheils in Oede und Armuth verwandelt. 6. *Die Zone der veränderlichen Regen*, jenseits 40° Br. In dieser Zone regnet es zu allen Zeiten an unbestimmten Tagen und in verschiedenen Mengen; jedoch gibt es auch hier Maximal- und Minimalzeiten. Während die subtropischen südlichsten Theile von Europa im Winter ein Max. des Regens erhalten, verschiebt sich dieses Max. auf den Frühling und Herbst für die Gegenden zwischen dem äußersten Süden und der großen Alpen-Balkankette; so gibt es in der Po-Ebene ein Frühling- und Herbstmaximum. In allen Ländern nördlich von dieser Gebirgskette fällt das Max. in den Sommer und das Min. in den Februar, während die Länder, die von den wandernden atlantischen Cyklonen zuerst getroffen werden, Norwegen und England wieder ein Max. im Herbst und Winter darbieten. Das Wetter und der Regen in dieser Zone wird von den wandernden Cyklonen und den lange stationären Anticyklonen regiert, deren Entstehung uoch nicht aufgeklärt ist, wodurch auch die Regenverhältnisse dieser Gegenden noch dunkel sind.

4. *Schnee, Graupeln, Hagel.* Wenn die Temp. der Wolken unter dem Eispunkte liegt, so fällt statt des Regens Schnee aus denselben herab; die Condensation geschieht dann nicht in Tröpfchen, sondern in hexagonalen Eisnadeln, die sich zu 6=strahligen Schneesternen von mannigfaltiger Gestalt gruppiren. Bei ruhiger kalter Luft fallen diese Sternchen herab; bei bewegter, weniger kalter Luft **614**

friert eine größere Zahl derselben durch Regelation zu größeren Schneeflocken zusammen, welche ihre lockere Beschaffenheit und ihre weiße Farbe durch ihre Luftzwischenräume und die dadurch bewirkte totale Reflexion erhalten. Im Frühling geht durch die geringere Kälte die Regelation bei stark bewegter Luft noch weiter und ballt die Eisnädelchen zu Schneekugeln, die man Graupeln nennt. Wie der Schnee dem Winter und die Graupeln dem Frühling angehören, fällt der Hagel im Sommer und zwar auch in der heißen Tageszeit, nur äußerst selten bei Nacht; er besteht aus Eisballen von Erbsen- bis Eiergröße, mit einem Kern von geballtem Schnee, der von concentrischen Eisschichten umlagert ist. Während Schneefälle tagelang dauern können, haben Graupelschauer und Hagelschlag höchstens viertelstündige Dauer.

Zur Bildung des Hagels ist jedenfalls eine sehr wasserdampfreiche Luft nöthig, weshalb er nur im Sommer und bei Tage entstehen kann; außerdem muß die Temp. der Luft nach oben stark abnehmen, was nur in den ersten Sommermonaten möglich ist. Ein Hagelwetter tritt gewöhnlich mit oder vor Gewitterregen auf und zieht in meilenbreiten Strichen mit einer Geschw. von mehreren M. per St. oft viele M. weit fort; dies erinnert an die wandernden Cyklonen, und da auch die heftigen Gewitter als kleine Wirbelstürme angesehen werden, so hält man auch ein Hagelwetter für eine kleine, aber lebhaft bewegte Cyklone. Im Innern derselben kann durch die Centrifugalkraft die Luftverdünnung so groß werden, daß kalte Luftmassen von oben herabsinken in den wasserdampfreichen Wirbel; hierdurch kann eine höhere Wolkenschicht aus Eisnadeln, eine tiefere aus unterkühlten Wassertheilchen bestehen. Die Wirbelbewegung vereinigt die ersteren zu Graupelkörnern, welche durch die unterkühlte Wolkenschicht fallend sich mit concentrischen Eisschichten umhüllen. Die Erklärung ist nur wenig befriedigend, noch weniger sind es aber die zahlreichen älteren Hageltheorien.

6. Die Elektricität der Luft.

615 **Die atmosphärische Elektricität.** Die Luft enthält immer schwache freie El., deren Quelle noch nicht sicher erkannt ist. Die atmosphärische El. ist bei heiterem Wetter in der Regel pos., während die der Erde neg. ist. Sie wächst und nimmt ab täglich wie die relative Feuchtigkeit und der Luftdruck, sie steigt nach Sonnenaufgang einige St. und nimmt dann ab bis einige St. nach Mittag; dann wächst sie wieder bis 2 St. nach Sonnenuntergang und nimmt dann bis Aufgang ab; sie hat also täglich zwei Maxima und zwei Minima. Auch im Jahreslaufe erreicht sie ein Maximum und zwar im Januar, und im Mai ein Minimum. Nahe an der Erde ist sie gleich Null und wächst an Spannung mit der Höhe. Bei Nebel ist die Luftel. noch stärker pos. als gewöhnlich, bei den übrigen Niederschlägen ist sie aber bald pos., bald neg., wodurch sich die Abnahme der pos. Luftel. bei trübem und windigem Wetter erklärt.

Man beobachtet die Luftel. hauptsächlich nach 2 Methoden: die ältere Methode brachte in der Höhe eine oder mehrere isolirte Saugspitzen an, welche mit einem empfindlichen Elektrometer in Verbindung gesetzt wurden und diesem die aufgesogene El. zuleiteten; neuere Beobachter stellen an einem erhöhten Punkte eine isolirte Kugel auf und bringen dieselbe für kurze Zeit mit der Erde in Verbindung; die Luftel. zieht dann die ihr entgegengesetzte El. in die Kugel, so daß diese bei Aufhebung der Verbindung mit der Erde geladen bleibt und dann bei der Einwirkung auf das Elektrometer die der Luftel. entgegengesetzte El. zeigt. Schübler erhielt 10m vom Boden entfernt eine Divergenz des Elektrometers von 15°, während in 60m Höhe die Divergenz 64° betrug und bei Nebeln doppelt so groß wurde. — Während man früher nach Volta die Verdunstung, dann nach Pouillet die Verdunstung und den Vegatationsproceß als Quelle der Luftel. anführte, schreibt man jetzt, nachdem Riess und Reich durch Experimente in diesen Processen keine El. hatten finden können, der Condensation die Erregung der Luftel. zu, wofür allerdings die stärkere El. des Nebels, die tägliche und jährliche Zunahme mit der Feuchtigkeit, das stete Zusammentreffen der Gewitter mit starker Cond. und die starken Blitze bei starken Gewitterniederschlägen zu sprechen scheinen, obwohl man experimentell keine Begründung für diese Ansicht beibringen kann. Nach Lamont ist die pos. El. der Luft nur eine Folge der neg. El. der Erde, nach Meißner eine Folge sämmtlicher Oxydationen; der gewöhnliche Sauerstoff enthält in jedem Mol. ein pos. und

ein neg. Sauerstoffatom, ein At. Antozon und ein At. Ozon; die Oxydation geschieht meist durch das Ozon, wodurch viel pos. Sauerstoff frei wird und nach Meißner die pos. Luftel. erzeugt. Mit dieser Ansicht trifft die älteste zusammen; Lavoisier, Laplace und Davy schrieben nämlich die Luftel. der Verbrennung zu; es spricht aber gegen dieselbe, daß die Luft hauptsächlich Ozon enthält (Edlunds Nordlicht-Theorie s. 617.).

616 **Das Gewitter**, eine mit Blitz und Donner verbundene starke Wolkenbildung und Entleerung derselben durch Regen oder Hagel, ist eine el. Erscheinung, der Blitz ist der el. Funke, der Donner ist der Knall desselben. Daß der Blitz ein el. Funke ist, folgerte schon Franklin aus der Uebereinstimmung der Wirkungen beider; der Blitz hat häufig, wie der künstliche el. Funke, Zickzackform, trifft wie dieser vorzugsweise die nächsten und spitzigsten Gegenstände, folgt den besten Leitern wie dieser, entzündet brennbare Gegenstände, schmilzt Metalle, zerstört schlechte Leiter, tödtet lebende Wesen, wie der Funke; er macht Eisen magnetisch, zerstört Magnetismus, stört Magnetnadeln, wie der el. Schlag, und bringt wie viele el. Entladungen den Ozongeruch hervor. Das Vorhandensein von großen Elektricitätsmengen bei Gewittern ist indessen auch direkt und zwar zuerst von Franklin und de Romas (1752) mittels des elektrischen Drachens nachgewiesen worden.

Franklin befestigte an einem Drachen einen aufrecht stehenden zugespitzten Draht und ließ den Windvogel bei einem herannahenden Gewitter in der Nähe von Philadelphia aufsteigen; an der hänfenen Schnur war unten ein Stück seidene Schnur befestigt, mittels welcher Franklin den Drachen hielt, während das Ende der Hanfschnur mit einem daran befestigten Schlüssel herabhing. Anfänglich zeigte sich keine Wirkung; als aber die Gewitterwolke dem Drachen näher kam, sträubten sich die losen Fasern der Schnur, und der Schlüssel gab beim Annähern des Fingers el. Funken, die beim Regen stärker wurden. De Romas erhielt 1757 Funken von 10′ Länge und der Stärke eines Pistolenknalles, benutzte aber, um sich zu schonen, einen Funkenzieher, der mit der Erde verbunden war; trotzdem wurde er einmal zu Boden geworfen. Der verdienstvolle Physiker Richmann unterbrach 1753 in Petersburg einen Blitzableiter, um die el. Natur des Gewitters zu studiren, wurde aber von dem aus der Unterbrechungsstelle stürzenden Blitze getödtet, den der anwesende Kupferstecher Sokolow in Gestalt eines Feuerballes nach dem Kopfe Richmanns überspringen sah. Wie nun die gewaltige El. der Gewitterwolken zu Stande kommt, ist nicht bestimmt aufgeklärt. Sie könnte dadurch entstehen, daß die El. der Luft sich immer mehr anhäuft, was bei langer, windstiller Heiterkeit der Fall sein muß, und wodurch sich auch die dem Gewitter vorausgehende Schwüle erklären dürfte, und daß dann die Wolke als guter Leiter auf ihrem rasch durchlaufenen großen Wege alle El. aufsammelt; wäre dies aber der Fall, so müßte die el. Spannung vor einem Gewitter immer mehr zunehmen, wofür keine Beobachtungen vorliegen; man denkt sich deßhalb, die große Menge von El. in einer Gewitterwolke entstehe mit derselben durch plötzliche Condensation und häufe sich so stark an, weil eine plötzliche Zerstreuung derselben nicht möglich sei.

Die Häufigkeit der Gewitter für die verschiedenen Erdgegenden ist sehr verschieden; während in der Polarzone oft in vielen Jahren kein Gewitter vorkommt, findet in den Tropen fast jeden Tag ein solches statt. Im Allgemeinen nimmt die Zahl der Gewitter mit zunehmender geogr. Breite ab; doch wirken auch andere Verhältnisse in ähnlicher Weise wie beim Regen mit; so ist die regenlose Zone fast gewitterlos und sind im Inneren des großen Continentes die Gewitter sehr selten; dagegen sind sie im mittleren Europa häufiger als an den Westküstenländern; während diese nur 6—10 Gewitter jährlich haben, finden in Italien 40, in Deutschland 30, im Osten aber nur 10—12 Gewitter durchschnittlich jährlich statt. Die meisten Gewitter kommen auf die warme Jahreszeit, doch gibt es auch Wintergewitter; im Allgemeinen sind dieselben selten; wo aber Winterregen überwiegt, ereignen sich auch mehr Wintergewitter; so kommen bei Bergen in Norwegen jährlich 7 auf den Winter und 5 auf den Sommer, während Stockholm und der weitere Osten kein Wintergewitter hat; auch in Island und Nordschottland kommen häufig Wintergewitter vor. Der Tageszeit nach fallen die meisten Gewitter auf den späten Nachmittag und Abend, seltener auf die Morgenzeit.

Dove unterschied Gewitter des aufsteigenden Luftstromes, des verdrängenden Polarstromes und des verdrängenden Aequatorialstromes; die neuere Meteorologie erklärt ebenfalls, die täglichen Gewitter in den tropischen Gegenden, die localen Nachmittagsgewitter unserer heißen Sommer, die besonders zahlreich in Gebirgen auftreten, seien Ascensionsgewitter; die Wintergewitter aber und die weit verbrei-

teten Sommergewitter, die ganze Länder durchziehen, entständen mit und durch Cyklonen, welche im Sommer in Westeuropa der vom atl. Ocean in die stark erhitzte Atm. hereinstürzende kühle und feuchte Nordwest erzeuge, während sie im Winter in der Heimath der Wintergewitter ohnedies häufig sind. Da das Gewitter eigentlich in der plötzlichen Bildung dunkler, gährender, nur 300 bis 2000^{m} hoch schwebender Wolken besteht, so gibt es auch stille Gewitter, die Platzregen; doch sind Blitz und Donner das Charakteristische des Gewitters. Man unterscheidet Linienblitze und Flächenblitze; die ersteren sind zickzackförmige, manchmal verästelte, scharf begrenzte, oft über 1000^{m} lange Lichtlinien von mehr weißem Lichte mit einem Stich ins Blaue, begleitet von lautem, lange rollendem Donner; die letzteren und häufigeren bilden eine gleichmäßige, röthliche, unbestimmt begrenzte Erleuchtung eines großen Theiles der Himmelsfläche mit leise murmelndem Donner oder ganz ohne Donner; seltenere Blitzformen sind die Schlangenblitze und die Kugelblitze oder Donnerkeile. Diese letzteren fahren immer, die Schlangen- und Linienblitze großentheils zur Erde, die Flächenblitze meist von Wolke zu Wolke; fahren die Blitze zur Erde, was man Einschlagen nennt, so ist der Donner ein starker Krach mit nachfolgendem Prasseln; im andern Falle entsteht durch den langen Weg des Blitzes und durch Reflexion ein langes Rollen, dessen stärkere Schläge von den Absprüngen, sowie von Reflexionen herrühren mögen. Beim Einschlagen trifft der Blitz die höchsten Gegenstände und besten Leiter und geht auf dem Wege in die Erde, der ihm am wenigsten Widerstände bietet. Gute Leiter werden durch den einschlagenden Blitz bei hinreichender Dicke unverändert durchsetzt, bei geringer Dicke glühend, geschmolzen oder in Staub aufgelöst, schlechte werden zertrümmert, brennbare Gegenstände entzündet; jedoch ist der kalte Schlag, bei welchem keine Entzündung getroffener Gebäude stattfindet, 2 bis 4 mal häufiger als der zündende Schlag, weil für die zündende Wirkung der el. Funke künstlich verzögert werden muß, was z. B. durch nasse Strohdächer stattzufinden scheint. Menschen und Thiere werden betäubt oder getödtet, Thiere öfter als der Mensch; doch kommen hierbei keine oder nur unerhebliche äußere oder innere Verletzungen vor. Ist der Blitz in das leitende feuchte Erdreich gelangt, so ist er ohne Spur verloren, in die Erde verbreitet; begegnet ihm vorher trockener Sand, so schmilzt er denselben zu Blitzröhren zusammen.

Da Regen häufiger neg. el. ist und bei Gewittern selbst die Luftel. bald pos., bald neg. erscheint, so können bei Gewittern an sich neg. und pos. el. Wolken vorkommen, und so bei hinreichender Annäherung ihre El. in der Luft als Blitz vereinigen; doch reicht hierzu auch die einfache Ladung einer Wolke mit einer Art von El. aus; denn diese zieht in einer benachbarten Wolke oder in einem nahen irdischen Gegenstande die entgegengesetzte El. nach den Principien der Influenz in das genäherte Ende, wodurch ebenfalls die beiden El. sich einander gegenüber befinden und den el. Funken erzeugen. Von welcher Wolke der Blitz ausgeht, von der neg. oder pos., ob er beim Einschlagen von der Erde oder von der Wolke herkommt, ist nicht entschieden; gewöhnlich nimmt man an, daß er im letzteren Falle aus der Wolke zucke; doch sind auch schon Blitze mit aufwärts gehender Bewegung, von der Erde zur Wolke springend beobachtet worden. Ob der Linienblitz nur ein fortschreitender Funke ist, der nur durch die Andauer des Lichteindruckes auf unsere Netzhaut als Linie erscheint, oder ob die Linienform ihm eigenthümlich ist, und ob in diesem Falle der ganze leuchtende Weg oft von Meilenlänge oder nur ein Theil desselben den el. Blitzfunken ausmacht, ist noch nicht entschieden. Die Zickzackform der Linienblitze erklärt man durch die Verdichtung der Luft vor dem el. Funken und das hierdurch verringerte Leitungsvermögen der Luft, was den Blitz zum Abspringen nach dünneren Luftmassen bewege; doch wird auch diese Erklärung angefochten. Arago behauptet, auf 1000 Flächenblitze komme nur ein Linienblitz; man hält diese Angabe für übertrieben und für veranlaßt durch Linienblitze hinter dunkeln Wolken, die dann nur als Wolkenleuchten erscheinen. Nach Kundt (1868) verhält sich die Zahl der Zickzackblitze zu der der Flächenblitze wie 6 : 11, und sind nach Spectralbeobachtungen die ersteren eigentliche el. Funken und zur Erde herabgehend, die letzteren Büschellicht von Wolke zu Wolke. Seltene Erscheinungen sind die Schlangen- und die Kugelblitze; die letzteren erscheinen als dicke Feuerkugeln mit einem Schweife und zerplatzen mit

einem lauten Knalle; sie haben eine Dauer bis zu 10 Sec., während die übrigen Blitze nur kleine Bruchtheile einer Sec. anhalten. — Der Donner entsteht durch die Lufterschütterung, welche mit dem el. Funken verbunden ist, und welche oft als ein Auseinanderwerfen und Wiederzusammenschlagen der Luftmassen aufgefaßt wird. Die längere Dauer des Donners erklärt man daraus, daß der Blitz eine bedeutende Länge besitze, und daß daher der Schall von den verschieden entfernten Punkten des Blitzes erst in verschiedenen Zeiten zu uns gelangen könne; doch ist das Rollen des Donners meist länger, als nach dieser Idee die Rechnung ergibt, wodurch man zu der Annahme gedrängt ist, daß die Reflexion des Schalles an Gebirgswänden, Wolken und dampfreicher Luft den Donner verlängere, wofür allerdings das lange Rollen des Donners in Gebirgen spricht. Für das Ab- und Zunehmen, das Poltern des Donners führt man ebenfalls die Reflexion und die Absprünge und Verzweigungen als Erklärungen an; Kämtz hält es für eine Schallinterferenz. Als ein einfacher scharfer Knall tritt der Donner auf, wenn der Beobachter von allen Theilen des Blitzes ziemlich gleich weit entfernt ist; man hält daher einen solchen Donnerschlag für ein Zeichen eines ganz nahen Einschlagens. Zur ausreichenden Einsicht in alle Verhältnisse des Donners fehlt noch sehr viel; möglicherweise sind alle angeführten Eigenthümlichkeiten nur Modificationen und allmälige Ausgleichungen der Lufterschütterungen; es ist nämlich unmöglich, daß eine große auseinander geschleuderte Luftmasse sich beim Wiederzusammenschlagen plötzlich beruhigen könne; die zusammenschlagenden Massen müssen vielmehr theilweise oftmals zurückgeworfen werden, theilweise nach dem Gesetze der Trägheit über die Stelle des Zusammenschlagens hinausgehen, dann zurück kehren, abermals aus einander gehen, und so erst nach längerer Zeit unter immer leiserem Grollen zur Ruhe gelangen. Aus dem Zeitzwischenraume zwischen Blitz und Donner kann man die Entf. des Blitzes von dem Beobachter berechnen, da das Licht des Blitzes sich nahezu momentan auf diese Entf. fortpflanzt, während der Schall für je 333m eine Sec. Zeit braucht; so viele Sec. also zwischen Blitz und Donner verfließen, so viel mal 333m ist der Blitz vom Beobachter entfernt. Ist der Blitz mehr als 3 M. von uns entfernt, so hört man den Donner nicht mehr, weil sich der Schall durch die Luft viel unvollständiger fortpflanzt als durch feste Körper; daher gibt es Blitze ohne Donner, ja es gibt auch solche aus heiterem Himmel und solche, welche in größter Nähe ohne nachfolgenden Donner beobachtet wurden, sowie umgekehrt Donnerschläge ohne Blitz. Die Dauer des Donners gibt ein Beobachter auf 2 bis 80 Sec. an.

Nach Mohn (1874) ist die Geschw. der Gewitter in Norwegen durchschnittlich 38km in der Stunde und zwar meist in der Richtung von SW nach NO. Es gibt Gewitter, die Hunderte von M. weit fortziehen; während dessen ist auf verschiedenen Stellen des Weges die Stärke sehr verschieden, manchmal ziehen sie für einige Zeit wieder rückwärts und dann abermals vorwärts; oftmals bewegt sich das Gewitter in entgegengesetzter Richtung wie die Wolken. Daraus folgt, daß das Gewitter nicht in einer Wolke oder Wolkenmasse seinen Sitz hat, die über die Erde hinzieht und sich nach und nach entladet, sondern daß die el. Zustände, welche das Gewitter erzeugen, von Wolke zu Wolke fortschreiten. Außer den Ascensionsgewittern, die in den heißen Zonen immer und in gemäßigten Gegenden in heißen Sommerzeiten vorkommen, unterscheidet die neuere Meteorologie noch Wirbelgewitter: solche sind besonders die Wintergewitter Norwegens, die bei starken südwestl. und westl. Stürmen entstehen und sich auf der Südostspitze des Wirbels bilden, wo die Luft warm und feucht ist; auch die Wintergewitter Frankreichs, Schottlands und Irlands sind als Folgen der Wirbelstürme bekannt, während umgekehrt die Windhosen, Tornados und Cyklonen immer mit Gewittern verbunden sind und an der warmen Seite der Sommerwirbel der gemäßigten Zone Gewitter auftreten.

Da der Blitz den nächsten besten Weg ins feuchte Erdreich nimmt, so trifft er zunächst hoch hervorragende, besonders spitz zulaufende Gegenstände, wie Thürme, Maste, Bäume, auf freiem Felde einzeln stehende, im Walde hervorragende Bäume, auf freiem Felde auch Heu- und Fruchthaufen, aufrecht stehende Menschen und Thiere; auf seinem Wege zieht er Metalle vor, durchbricht selbst Mauern, um dieselben zu erreichen, zerschmilzt und zerstäubt sie, wenn sie zu dünn sind; größere Menschen- und Thiermengen bilden durch ihren Dunststrom einen besseren Leiter, ebenso Luft- und Rauchzüge. Am heftigsten sind immer die Blitzwirkungen an den Stellen des Auf- und Absprunges, sind oft nur hier merklich. Die vom Blitze Erschlagenen werden meist momentan getödtet, werden nach ihrem Tode noch in der früheren Lage, mit offenen Augen angetroffen; manchmal finden sich unbedeutende Flecken und Streifen auf der Haut, im Innern keine Zerstörung; die nur Betäubten haben nach der Genesung keine Erinnerung des Vorganges. Manche verspürten Besserung ihrer Gesundheit. Nach Boudin werden in Frankreich im Durchschnitt jährlich 100 Menschen vom Blitze getödtet. Als Vorsichtsmaßregeln merke man: In Zimmern hüte man sich, unterbrochene Leitungen mit seinem Körper auszufüllen, bleibe entfernt von Wänden, Fenstern, Kaminen, Spiegeln, Glockenzügen, öffne ein Fenster, aber vermeide den Zug; auf der Straße bleibe man in der Mitte, auf dem Felde halte man sich in der Mitte

zwischen Bäumen, auf freiem Lande mache man sich so klein als möglich; schnelles Laufen eines Einzelnen erhöht die Gefahr nicht wesentlich, wohl aber schnelles Laufen von Vielen hinter einander.

Der *Blitzableiter* (Franklin 1753) dient zum Schutze eines Gebäudes vor den Wirkungen des Blitzes; er soll nicht nur Blitzschläge verhüten, sondern auch, wenn solche unvermeidlich sind, sie unschädlich in die Erde leiten. Zu dem Zwecke besteht er aus einer das Gebäude weit überragenden, zugespitzten Metallstange, der Auffangestange, welche in ununterbrochener, vollkommen leitender Verbindung mit einer in die feuchte Erde sich verzweigenden Ableitung steht. Zieht über solche Stangen eine el. Wolke, so zieht diese die entgegengesetzte El. der Erde durch die Spitze der Stange heraus und neutralisirt sie und sich hierdurch, wodurch Blitze verhütet werden; wenn aber die Menge der El. der Wolke zu groß ist und sie dennoch auf das Gebäude überspringt, so muß sie durch die Spitze der Stange aufgefangen und in die Erde geleitet werden. Um diese Zwecke zu erfüllen, muß die Spitze möglichst vollkommen und rein metallisch, die Leitung ununterbrochen und stark genug sein, um nicht zu schmelzen, und die Ableitung nicht in trockene Erde oder geringe, abgeschlossene Wassermengen, sondern in das feuchte Erdreich, in Flüsse stattfinden. Kupferdrahtseile mit Silberspitzen bilden die besten Blitzableiter; der Billigkeit halber wendet man aber gewöhnlich eiserne Stangen mit vergoldeter Spitze oder einem Ende von Platin oder Silber an. Nach vielfacher Erfahrung schützt eine Auffangestange höchstens auf einen Umkreis, dessen Radius gleich der 1½fachen Länge der Auffangestange ist; längere Gebäude müssen daher mehrere Auffangestangen haben, welche durch eine über der Dachfirste hinlaufende Stange verbunden sind, von der die Leitung zum Boden herabgeht. Diese Stangen haben am besten einen kreisförmigen Querschnitt von wenigstens 15^{mm} Durchmesser (bei Kupfer 5^{mm}); mit ihnen müssen alle Metallmassen des Gebäudes in leitender Verbindung stehen, weil dieselben sonst für sich den Blitz anziehen. Die Ableitungsstange muß, wo sie in die Erde eindringt, von Kohle umgeben sein, um sie vor Rosten zu schützen und die Leitung zu verbessern; kann man sie in große Wassermassen führen, so reicht es aus, sie mit einer Endplatte zu schließen; sonst muß man durch mehrere Endplatten den Ausfluß der El. in die Erde möglichst erleichtern. Nach einer neuerlichen Schrift „Die Zunahme der Blitzgefahr" von Holtz ist zwar die Anzahl der Gewitter jetzt nicht größer als früher, aber die Gefahr des Einschlagens ist größer, insbesondere durch die vielfache Verwendung des Eisens als Baumaterial. Zur Verminderung der Gefahren wird statt des oben geschilderten Blitzableitersystems von Gay-Lussac das Melsens'sche System empfohlen, welches alle irgendwie exponirten Punkte der Gebäude mit kleineren Fangstangen versieht und durch Leitungsdrähte mit der Erde verbindet.

Häufig empfinden Menschen während eines Gewitters einen elektrischen Schlag, oder es werden Menschen und Thiere getödtet, ohne direct vom Blitze getroffen zu sein, aber in demselben Augenblicke, wo an entfernter Stelle ein Blitz stattfand; in solchen Momenten bemerkt man auch an nicht getroffenen Gegenständen Funken. Man nennt diese Erscheinungen den *Rückschlag*; derselbe beruht darauf, daß die el. Wolke die entgegengesetzte El. der Erde anzog, die gleichnamige aber in entfernte Gegenstände abstieß, daß dann die erste durch den Blitz neutralisirt wurde, und nun die abgestoßene El. der Abstoßung ledig als gewöhnliche freie El. wirken konnte. Eine andere Nebenerscheinung der Gewitter ist das *Wetterleuchten*, hellleuchtende Flächenblitze bei dunkler Nacht ohne Donner. Sie sind entweder der Widerschein entfernter Gewitter, können deßwegen auch am hellen Himmel auftreten, oder das ruhige Ausströmen von Büschellicht aus schleierartigen Wolkenüberzügen. Der letzteren Erscheinung ähnlich ist das *St. Elmsfeuer*, bei den Alten Hermesfeuer oder auch Castor und Pollux genannt; sie besteht darin, daß bei stark elektrischem Zustande der Luft in dunkler Nacht, bei Regen, Schnee und Sturm, besonders im Winter bei Südwestwind, häufig auf spitzen oder scharfkantigen Gegenständen, wie Masten, Helm- und Lanzenspitzen, Pferdeohren, Huträndern, Baum- und Buschzweigenden kleine büschelartige Flämmchen erscheinen, welche manchmal mit leisem Rauschen verbunden sind; doch hat man auch solche Flämmchen auf offenem Meere, auf ebenen Gegenständen wahrgenommen, und mögen manche Irrlichterscheinungen ähnlicher Natur sein.

617 **Das Nordlicht.** In der Region der Calmen ist fast jeden Tag ein Gewitter, während das Nordlicht und das Südlicht dort äußerst selten sind; nur die größten Polarlichterscheinungen gehen bis zu 20° Br., und zwar finden dann gewöhnlich Nord- und Südlicht zusammen statt, so daß in solchen Nächten fast die ganze Erde in einen Lichtmantel gehüllt ist. In höheren Br. wird die Zahl der Gewitter immer kleiner, aber die der Polarlichter immer größer; endlich in den polaren Gegenden ist ein Gewitter äußerst selten, dagegen fast jede Nacht von Nordlicht erhellt. Dieser Zusammenhang deutet die el. Natur des Nordlichtes an; wo die el. Entladung durch Blitz und Donner fehlt, tritt die Glimm- oder Glühlichtentladung an ihrer Stelle als Polarlicht auf. Humboldt nannte das Nordlicht ein magnetisches Gewitter, weil bei dessen Auftreten Magnetnadelstörungen beobachtet wer-

den; man könnte es im Gegensatze zu dem gewöhnlichen Blitz- und Büschellichtgewitter auch ein Glühlichtgewitter nennen. Bei uns tritt das Nl. meist als Feuerschein am nördl. Himmel auf; seine Erscheinung in Skandinavien wird folgendermaßen beschrieben: kurz nach der Abenddämmerung entsteht in der Gegend des magn. N. nahe am Hor. ein dunkles, von hellem Saume umfaßtes Segment, dessen höchster Punkt im magn. Meridian liegt. Aus dem bald breiter und heller werdenden Saume schießen Strahlen in radialer Richtung nach allen Himmelsgegenden hinaus, etwa von der Breite des Mondes, an Glanz und Länge lebhaft wechselnd, bald mehr als 90° über das Segment hinaus, bald bis zum Verschwinden sich verkleinernd. Wo die Erscheinung besonders stark auftritt, vereinigen sich die am höchsten aufsteigenden Strahlen zu der Nordlichtkrone, südlich vom Zenit an der Stelle des Himmels, wohin der Südpol der Inclinationsnadel zeigt. **Karl Weyprecht** hat (1879) seine Nordlichtbeobachtungen bei der großen östreichischen Nordpolexpedition (1872—74) veröffentlicht und unterscheidet an dem Nl. folgende Gestaltungen: 1. Bogen, nahezu regelmäßige, regenbogenförmige Erscheinungen, die sich vom magn. N. gegen das Zenit heben und senken. 2. Bänder, unregelmäßige in der Atm. treibende, bandförmige Lichtstreifen, häufig in Biegungen und Falten gekrümmt. 3. Fäden, d. s. Lichtstrahlen, nach dem magn. Zenit hinschießend, fächerartig gestellt und durch Dunkel getrennt. 4. Krone, die Vereinigung der Strahlen und Bänder im magn. Zenit in mehr oder weniger intensiver Bewegung um dieses Centrum. 5. Nordlichtdunst, formlose Anhäufung von Lichtmaterie an irgend einer Stelle des Firmaments. Solche formlose Lichtlagen hat Lemström schon (1868) auf den Bergspitzen von Spitzbergen wahrgenommen und durch Spectralanalyse als identisch mit dem Nordlicht erkannt; später (1871) beobachtete er dieselben Erscheinungen auf den Bergen Lapplands; auch Wijkander fand bei seiner Ueberwinterung in Spitzbergen (1872—73) die Berggipfel und Wolken mit Glühlichtsäulen bekrönt; dagegen sah Nordenskiöld bei der Ueberwinterung der Vega (1878—79) in der Beringsstraße nur den schwachleuchtenden Bogen, Tag für Tag unverändert in seiner Stellung und seinem schwachen Lichte; aus dieser und anderen Beobachtungen hat er (1882) geschlossen, daß die Erde selbst in der Minimalzeit des Nls. einen beständigen Lichtkranz trägt, die Nordlichtglorie, welche damals eine Höhe von 26 M. und einen Durchm. von fast 300 M. hatte, und deren Mittelpunkt, der Nordlichtpol, etwa in der Mitte zwischen dem geogr. und dem magn. Pol, aber 15° westlicher als dieser lag. Die Nordlichtglorie scheint über dem Nordlichtgürtel zu schweben. Es war nämlich schon vorher festgestellt, daß die Zahl der Nl. nicht bis zu dem geogr. oder magn. Pole fortwährend zunimmt, sondern von einer gewissen hohen Br. nach den Polen hin wieder abnimmt; am deutlichsten tritt dies in den graphischen Darstellungen von Loomis und Fritz hervor, welche auf Landkarten die Orte gleicher Häufigkeit der Nl. durch Linien verbanden. Es stellte sich hierdurch eine Maximalzone des Nordlichtes heraus; dieser Nordlichtgürtel zieht vom Nordcap (70°) südwestl. steil herab an Island und Grönland vorbei, durchschneidet Labrador und die Hudsonsbai in 57° Br., bleib. also hier 17° südl. vom magn. Nordpol. hebt sich langsam bis zur Westküste von Amerika ·uf 70°, zieht dann der Nordküste von Asien entlang, bis er im N. von Nowaja Semlia seine nördlichste Lage von 77° erreicht und dann allmälig zum Nordcap herabgeht. Die anderen Linien gleicher Nordlichthäufigkeit, welche Fritz Isochasmen nennt, laufen der Maximalzone ziemlich parallel, womit der Reichthum von Nordamerika an Nl. angedeutet ist, so daß z. B. Newyork soviel Nl. hat als das 20° nördlicher liegende Petersburg. In der Maximalzone geht das Nl. nie aus; dieselbe hat jedoch noch andere unerwartete Eigenheiten; während in niederen Br. die Nl. fast immer gleichzeitig mit Magnetnadelstörungen auftreten und Weyprecht diesen Zusammenhang auch nördl. von der Zone in Franz-Josephsland wahrgenommen hat, sind in der Zone selbst auch bei starken Nl. keine magn. Störungen zu beobachten. Nördlich von der Zone scheinen die Störungen nach Wijkander einen anderen Charakter zu haben als südl. von derselben; endlich steht der Nordlichtbogen an südl. von der Zone gelegenen Orten im N. und an nördl. Orten im S., so daß also die Zone die eigentliche Heimath der Nl. zu sein scheint.

Die Zahl der Nl. ändert sich indeß nicht blos mit dem Orte, sondern auch an einem und demselben Orte mit der Zeit. Zunächst zeigt die Häufigkeit der Nl. eine jährliche Periode: sie ist zur Zeit der Nachtgleichen am größten und zur Zeit der Solstitien am kleinsten; diese Periode stimmt mit der jährl. Periode der Zahl und Intensität der magn. Störungen überein. Außerdem besteht auch für das Nordlicht die 11jährige Periode. Wie Wolf für die Sonnenflecken nachgewiesen hat, daß dieselben in den letzten zwei Jahrhunderten durchschnittlich nach je 11 Jahren ein Maximum an Stärke und Zahl erreichten, und in der Zwischenzeit, etwas nach deren Mitte ein Minimum, so hat Prof. Hermann Fritz in Zürich seit 1862 dargethan, daß auch die Nordlichter in Zahl und Stärke nach je 11 Jahren ein Max. haben und zwischen je 2 Maximis ein Minimum; außerdem hat Fritz mit seinem großen Nordlichtkatalog gezeigt, daß außer der kleinen Periode von 11 J. noch eine große von 55 bis 56 Jahren besteht, indem die Einzelmaxima der Nordlichter nicht einander gleich sind,

sondern eine Ab- und Zunahme in derartig regelmäßiger Weise erkennen lassen, daß sie nach je 55 Jahren ein Hauptmaximum haben, das auch bei den Sonnenflecken unverkennbar, aber bei den Nordlichtern schärfer ausgeprägt ist, und für diese auf mehr als 2000 Jahre nachgewiesen werden kann, ja selbst eine 220jährige Periode der Nordlichter gewinnt nach

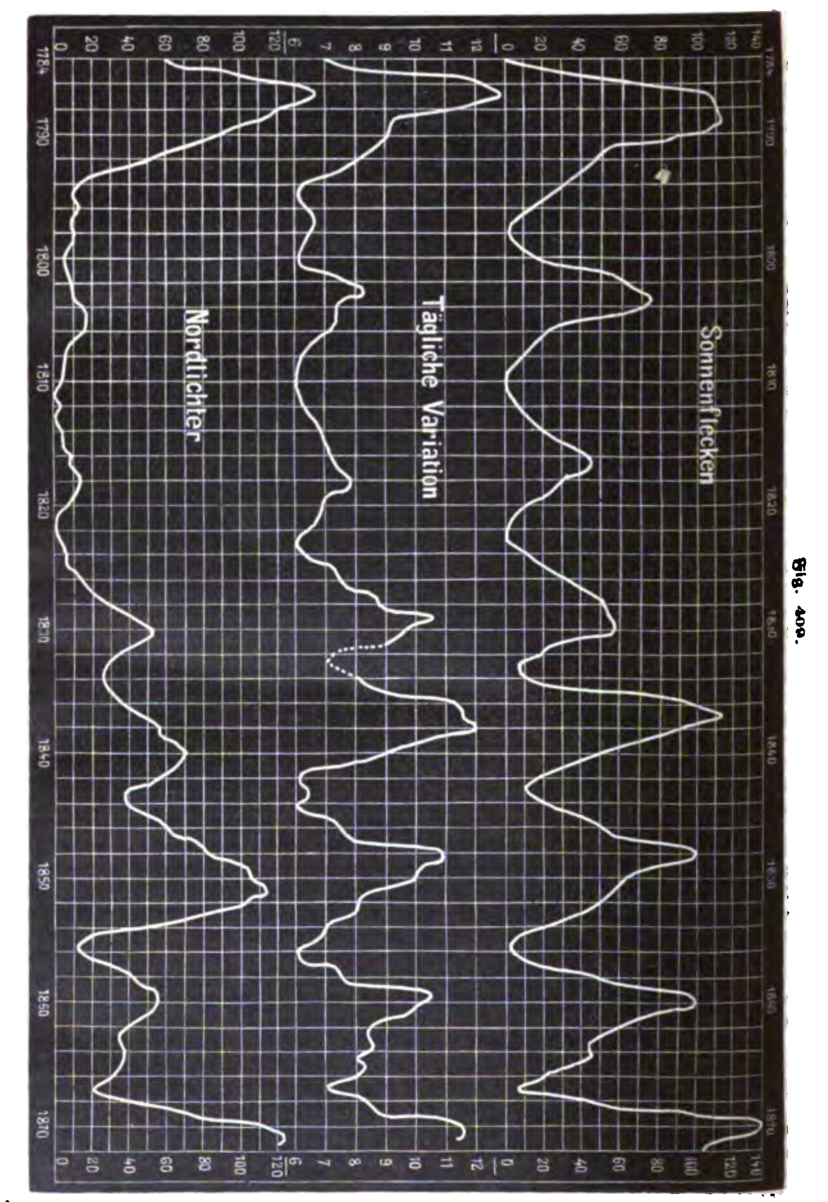


Fig. 409.

fit eine ziemliche Wahrscheinlichkeit. Das Merkwürdigste an dieser Uebereinstimmung zwischen beo... lichtern und Sonnenflecken ist jedoch nicht die Gleichheit der Perioden, sondern das Zu- Büschel... fallen der Maximalzeiten und Minimalzeiten der beiden Phänomene; dazu kommt blitze; die daß auch die Größen des Erdmagnetismus dieselbe 11jährige Periode und die

oincidenz der Maximalzeiten aufweisen: Nach je 11⅑ Jahren findet ein Max. der Son-enflecken, der Nordlichter, der täglichen Variation der Declination, der Horizontalintensität es Erdms. und der Perturbationen der Magnetnadel statt; in demselben Jahre, wo die Sonne die meisten und größten Flecken hat, haben wir auf der Erde die meisten und herr-chsten Nordlichter, zeigt die Magnetnadel die größte tägliche Variation und die stärksten Störungen und hat der Erdms. seine größte Intensität. Am deutlichsten springt dieser bis zt unerklärte Zusammenhang in die Augen, wenn man das Steigen und Fallen der Er-heinungen graphisch darstellt, wie es in Fig. 409 für die drei wichtigsten derselben ge-hehen ist.

Diese Uebereinstimmung in den Perioden und das Zusammenfallen der Maximalzeiten euten darauf hin, daß das Nl. durch den Erdmagnetismus, also nach Ampères Theorie urch elektrische Ströme der Erde entsteht, während der oben hervorgehobene Zusammen-ang mit den Gewittern ebenfalls auf die elektrische Natur des Nordlichtes hinweist. Für ieselbe sprechen auch die galvanischen Ströme, die in Telegraphenleitungen während eines Nl. auftreten, die äußere Aehnlichkeit mit dem el. Lichte der Geißler'schen Röhren und die nnere Uebereinstimmung, die aus den spectralanalytischen Untersuchungen hervorgeht, in-em das Sp. des Nl. ein Liniensp. ist. Das Bogenlicht und die weißen Strahlen haben n Sp. nur eine einzige gelbe Linie, die in keinem Sp. irdischer und Himmelskörper vor-ommt und noch völlig räthselhaft ist. In den rothen Banden des Nl. sieht man außer-em eine rothe Linie und in der Krone noch mehrere violette Streifen. Wenn nun die el. Natur des Nl. schon längst erkannt war, so ist doch erst von Edlund (1878) eine allgemein nerkannte *Theorie des Nordlichtes* aufgestellt worden, die sich auf seine Aethertheorie er El. gründet, wodurch auch diese mehr Anklang gefunden hat (533.); indessen kann die Nordlichttheorie auch ohne die Aethertheorie, durch Beziehung auf die unipolare Induction orgetragen werden. Bekanntlich ist die Erde ein Magnet und besteht der Erdms. aus el. Strömen, die im Innern der Erde von Osten nach Westen kreisen, während sich die Erde elbst von W. nach O. dreht; der Erdmagnet ist demnach von einer Hülle, der Erdkruste und er nach oben immer besser leitenden Atm. umkreist. Mit dieser Hülle dreht sich auch ihr Aether von W. nach O. und bildet dadurch el. Kreisströme von W. nach O. Da diese Aetherströme mit den Magnetströmen der Erde entgegengesetzte Richtung haben, so stoßen e nach den Grundregeln der Elektrodynamik einander ab. Die Erscheinungen der Abstoßung nd complicirt wegen der Kugelgestalt der Erde und wegen der nicht genau ostwestl. Rich-ung der Erdströme, wegen der Lage der Magnetpole außerhalb der geogr. Pole; wir können ur die einfachsten Fälle ins Auge fassen. Am Aeq. fällt die Richtung der Abstoßung zwischen em Erdstrom und dem Aetherstrom in den Radius der Erde, der Aetherstrom wird daher ur nach außen gestoßen, der Aether in der Luft vermehrt sich, während er sich in der Erd-inde vermindert, die Luft wird pos., die Erde neg. el. Wegen der nach oben zunehmenden eitungsfähigkeit der Luft wächst die pos. Luftel. mit der Höhe; da dieselbe jedoch immer von en Magnetströmen der Erde abgestoßen wird, so kann sie sich erst dann mit der neg. El. er Erde vereinigen, wenn die Menge dieser beiden El. sehr groß geworden ist. Und diese Menge derselben wächst am Aequator sehr rasch; denn hier ist die Rotationsgeschw. des Aethers, also die Intensität der Aetherströme und ihre Abstoßung am stärksten; außerdem wirkt die Abstoßung nur radial nach außen, treibt also den Aether nicht nach den Polen u, sondern nur nach außen; deßhalb nimmt die pos. El. der oberen Luft und die neg. El. er Erde so rasch zu, daß sie bald stark genug sind, den Widerstand der Abstoßung zu über-winden und sich so in täglichen, gewaltigen Gewittern zu vereinigen. Die Edlund'sche Theorie erklärt also auch die *Entstehung der Luftel.*, *der Gewitter und deren Häufigkeit am Aeq.* Fassen wir nun das andere Extrem, die Sachlage an den Polen ns Auge; unter der Voraussetzung, daß der magnet. mit dem geogr. Pole zusammenfalle, nd auch dort die Aetherströme concentrisch zu den Magnetströmen, aber beide liegen hier n der Erdoberfläche, der Aetherstrom wird durch die Abstoßung in der ebenen Oberfläche der Erde nur weiter, aber nicht nach außen getrieben; außerdem ist wegen des kleinen Radius ie Geschw. und daher die Intensität der Abstoßung so gering, daß die Wirkung überhaupt erschwindend klein wird. Man glaubte früher, wegen der Heimath der Nl. in der Polar-one müsse dort die Luftel. ganz ausnehmend stark sein; aber Wijkander hat während seiner Ueberwinterung in Spitzbergen selbst an diesem noch 10° vom Pole entfernten Orte nur eringe El. wahrgenommen. Wegen der Kugelgestalt der Erde muß indeß der abgestoßene Aether der Erdkruste auch eine geringe Neigung nach außen haben, aber jedenfalls von dem Pole weg nach Süden zu, etwa nach dem Polarkreise hin. Weil aber der Magnetpol nicht mit dem Erdpol zusammenfällt, so wird die Anhäufung der ausströmenden pos. El. nach inem Gürtel um beide Pole hin stattfinden müssen, wodurch uns schon hier der Nordlicht-gürtel entgegentritt. — Wenn nun am Aeq. die Abstoßung nur radial oder vertical, am Pole nur horizontal stattfindet, so muß sie an zwischenliegenden Orten eine vert. und eine hor. Comp. haben. Die hor. Comp. läßt sich auch aus den Ampère'schen Erdströmen ab-

leiten: südlich vom Aeq. sind ebenso viele Erdströme, als nördl.; beide Klassen wirken auf den Aetherstrom am Aeq. gleich stark abstoßend, weßhalb derselbe weder nach N. noch nach S. getrieben wird; aber z. B. ein Aetherstrom in 50° Br. hat im S. eine viel größere Anzahl von Erdströmen hinter sich als im N. vor sich; er wird folglich nach N. getrieben. Weil demnach in höheren Breiten der Aether, die pos. El. der oberen Luft nach N. abstößt, so häuft sie sich in diesen Br. weniger stark an, die Luftel. ist im Allgemeinen schwächer; weil die vert. Comp. der Abstoßung nach N. immer kleiner wird, so ist auch der Widerstand gegen ihre Vereinigung mit der neg. der Erde kleiner, die Gewitter werden nach N. zu weniger häufig und weniger stark. Da die hor. Strömung der pos. El. in der hohen Luft von den höheren Br. nach N. und von der nördl. Polgegend nach S. stattfindet, so muß die pos. El. in einem Gürtel zwischen höheren Breiten und den Polen am stärksten angehäuft werden, also in dem Nordlichtgürtel; hier ist aber die vert. Comp. der Abstoßung so gering, daß der Widerstand gegen die Vereinigung der pos. Luftel. mit der neg. der Erde ebenfalls gering ist; die Vereinigung findet daher fortwährend mit Glimmlicht oder Glühlicht statt, wodurch der Mangel an Gewittern und die fast ununterbrochene Dauer des N. in dieser Gegend sich erklärt, die Nordlichtglorie. Mit Edlunds Theorie stimmen auch die Beobachtungen und großartigen Experimente von Lemström. Schon 1871 befand er sich mitten in dem gelblichen N.-Dunst, sah die charakteristische gelbe Spectrallinie in der ganzen Umgegend und in einer Geißler'schen Röhre ein helles Glimmlicht; damals schon bedeckte er eine Fläche von 2qdm mit zahlreichen Kupferdrahtspitzen und ließ von hier einen Draht an ein fernes Galvanometer gehen, dessen anderes Drahtende in die Erde ging; auf den Drahtspitzen zeigte sich ein Nordlichtstrahl und die Galvanometernadel wurde so abgelenkt, daß sie einen pos. Strom aus der Luft in die Erde anzeigte; 1882/4 brachte er auf Berggipfeln in Lappland ganze Drahtspitzenwälder an, wodurch der betreffende Gipfel den leuchtenden Dunst oder Strahl erhielt, während die anderen Gipfel dunkel blieben; diese künstliche Herstellung des Nordlichtes veranlaßte ihn zu dem Ausspruche, daß das Nordlicht eine elektrische Glimmlichtentladung sei, und daß der Nordlichtglorie in der Luft und dem Nordlichtgürtel auf der Erdfläche ein Erdstromgürtel im Innern der Erde entspreche.

7. Die Vorausbestimmung des Wetters, die Wetterprognose.

618 Die alten volksthümlichen Wetterprophezeihungen sind von der wissenschaftlichen Meteorologie großentheils nicht bestätigt worden, und vor allen nicht die populärste, der Einfluß des Mondes auf das Wetter, daß mit wachsendem Lichte die Kälte steigt, daß der Vollmond die Wolken auflöst, daß bei Mondwechsel auch Wetterwechsel eintreten u. s. w. Mehrhundertjährige Wetterbeobachtungen wurden mit den Stellungen und Lichtwechseln des Mondes verglichen, aber es ergab sich kein Zusammenhang. Der gewöhnliche Einwand hiergegen, daß der Mond das Wasser der Weltmeere hebe, also auch das Luftmeer zu Fluth und Ebbe bewegen müsse, wird ebenfalls durch die Erfahrung widerlegt; denn die Richtigkeit dieser Folgerung vorausgesetzt könnte der Mond doch den Luftdruck nicht ändern, da die höher gewordene Luftsäule doch noch dasselbe Gewicht haben müßte; wollte man aber durch den Abfluß der gehobenen Luft die täglichen Barometervariationen erklären, so müßten dieselben wie die Fluth jeden Tag 50 Min. später eintreten, während sie immer zu denselben Tageszeiten stattfinden, also nur durch Wärme und Wasserdampf erklärlich scheinen. Ebenso wenig Berechtigung haben die meisten Bauernregeln, während manche derselben wie auch die meisten Seeschifferregeln durch die Wissenschaft bestätigt werden; zu den ersteren gehört die süddeutsche Bauernregel: „Urban (25. Mai) bringt keinen Frost mehr her, der dem Weinstock gefährlich wär", weil dann die Tage der 3 Eisheiligen längst vorbei sind. Ebenso „Morgenroth bringt Abends Koth" und „Abendroth machts Wetter gut", weil Morgenroth anzeigt, daß schon vor Sonnenaufgang die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist, also durch die Tagesverdampfung leicht übersättigt werden kann, während Abendroth beweist, daß die Luft erst durch die lange Tagesverdampfung der Sättigung nahe kam, also beim Aufhören derselben bald trocken sein wird. Ganz unberechtigt ist auch nicht die Regel, daß steigender Nebel Regen und fallender schönes Wetter anzeigt, weil das erste zeigt, daß oben kalte Luft herrscht, die durch den Ascensionsstrom übersättigt wird, während letzteres einen oben herrschenden warmen Strom anzeigt, in dem sich die Nebeltheilchen lösen. Noch mehr Berechtigung haben die Regeln der Seeschiffer, weil diese zu genauer Beobachtung des ihre Existenz bedingenden Wetters gezwungen sind; dieselben beobachten hauptsächlich das Aussehen des Himmels bei Sonnenauf- und -untergang, die Höfe und Kränze um Sonne und Mond und die Art der Bewölkung. Von den zahlreichen Regeln möge eine hervorgehoben werden: Wenn die Sonne hinter einem schmalen Wolkenstreifen untergeht, so ist Wind von der Richtung zu erwarten, wo sich dieser Streifen befindet. Diese Regeln gründen sich auf die Luftfeuchtigkeit, die allerdings

ein wesentliches meteorologisches Element bildet, aber nach der Meinung der modernen Meteorologen deßhalb unzuverlässige Urtheile erzeugt, weil sie sich mit der Localität ändert, in nicht weit von einander entfernten Orten wesentlich verschieden sein kann. Indessen sind die Beamten des meteorologischen Dienstes der Vereinigten Stuaten gehalten, jene Schifferregeln zu beachten, und von den hieraus gezogenen Vorausbestimmungen sollen 80% eintreffen.

Auch die Vorausbestimmung mittels des Klinkerfues'schen Patentbifilarhygrometers beruht auf der Luftfeuchtigkeit und zwar speciell auf dem Thaupunkte. Das Hygrometer gibt durch seinen Zeiger die relative Feuchtigkeit in Procenten an, ein damit verbundenes Thermometer die Lufttemp. Mit beiden Daten geht man in die sogenannte Reductionsscheibe, welche aus der festen Procentsatzskale und der drehbaren Temperaturskale besteht; dreht man letztere so lange, bis die Thermometerablesung der Hygrometerablesung gegenüber steht, so weist der 100% Strich auf den Thaupunkt hin. Nach der Vorschrift von Klinkerfues muß man nun den gefundenen Thaupunkt mit der mittleren Temp. des Tages vergleichen, die mit der Morgens oder Abends um 8 beobachteten Lufttemp. übereinstimmen soll. Die Differenz zwischen Thaupunkt und der mittl. Temp. ist maßgebend für das zu erwartende Wetter; je kleiner sie ist, um so eher ist Niederschlag zu erwarten, besonders wenn zu irgend einer Tageszeit der Thaupunkt über die Mitteltemp. steigt. Im Allgemeinen soll wegen des langsamen Fallens der Nebelbläschen der Regen einen Tag später eintreten als seine Ursache; da er jedoch auch früher oder an einem anderen Orte eintreten kann, wie Klinkerfues speciell bemerkt, so ist die Sicherheit der Erwartung von Regen oder Sonnenschein ganz wesentlich gestört; außerdem müssen auch Ausnahmen zugelassen werden; sicherer scheint die so wichtige Prognose der Nachtfröste, die eintreten sollen, wenn der Thaupunkt Abends unter den Gefrierpunkt sinkt, weil nach Beobachtungen der abendliche Thaupunkt mit der niedrigsten Temp. des folgenden Morgens stimmen soll; und weil ein Sinken der Temp. unter den Thaupunkt unwahrscheinlich ist, indem durch die eintretende Condensation und die frei werdende Dampfwärme die Temp. erhöht würde, während in klaren Nächten das Sinken bis zum Thaupunkt leicht eintreten kann.

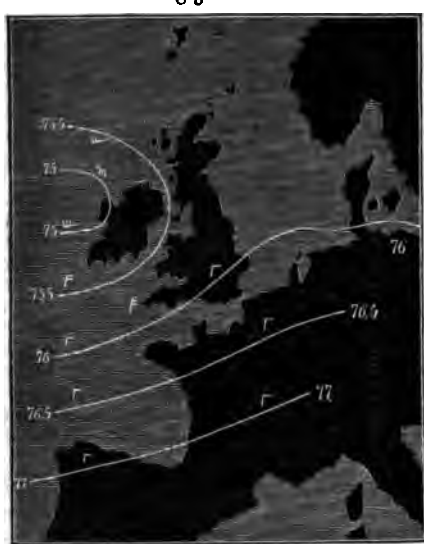
Die wissenschaftliche Wetterprognose der modernen Meteorologie für weite Wettergebiete beruht auf folgenden drei Voraussetzungen: 1. Abhängigkeit des Wetters der gemäßigten Zone von den Cyklonen und Anticyklonen. 2. Tägliche telegraphische Mittheilung der gleichzeitigen meteorologischen Elemente zwischen den Centralstationen des Wettergebietes und unmittelbare Construction der Wetterkarten. 3. Kenntniß der Eigenschaften und Wanderungen der Cyklonen und Anticyklonen, wobei von besonderer Wichtigkeit die verschiedenen Zugstraßen sind.

ad 1. Die ältere oder Dove'sche Meteorologie hielt das Wetter der gemäßigten Zone für bedingt durch den Wechsel des in der Höhe abgekühlten und dadurch herabsinkenden Aequatorialstromes (SW) mit dem schon unten wehenden Polarstrom (NO), also der beiden Passatwinde. Die moderne Meteorologie gesteht dem NO-Passat nur das Wetter der warmen Zone zu und dem SW-Antipassat nur das Herabsinken in 30° Br. und die Erzeugung des dort waltenden Maximalluftdruckes. Das Wetter der gemäßigten Zone aber ist nach der mod. Met. bedingt durch die Cyklonen und Anticyklonen, und da die ersteren Dm. bis zu 500 M. besitzen, so sind die Cyklonen die Ursachen des Wetters von weiten Gebieten; z. B. das Wetter von fast ganz Europa wird großentheils durch die Cyklonen des nordatl. Oceans verursacht.

ad 2. Dove richtete zuerst (1830—40) ein Netz gleichzeitiger Wetterbeobachtungen für ein größeres Land, Preußen ein und schloß aus denselben u. A. sein Winddrehungsgesetz, das allmälige Vorrücken der Wettererscheinungen von W. nach O., die Vertheilung des Regens in Deutschland. Im Anfange der fünfziger Jahre folgten England, Nordamerika u. s. w.; durch die von Leverrier (1855) vorgeschlagene telegraphische Verbindung der Stationen ergab sich, daß bei einem Sturme Nord- und Südengland entgegengesetzte Winde hatten, ebenso wie West- und Ostengland, wodurch es bald feststand, daß die Stürme der gemäßigten wie die der tropischen Zone Cyklonen seien; in dem kleinen holländischen Netze hatte Buys-Ballot durch die telegraphische Verbindung (1857) das Gesetz der Windströmung zu dem Minimum erkannt. Leverrier gab zuerst eine Isobarenkarte (1858) mit Windrichtungen heraus. Jetzt werden dieselben von den Centralstationen aller Länder täglich ausgegeben, in Nordamerika sogar mehrfach und mit gleichen absoluten Beobachtungszeiten; eine solche Isobarenkarte vom 22. Dec. 1880 für Westeuropa stellt Fig. 410 dar. Die kurzen Pfeilstriche geben nach der Befiederung hin die Windrichtung, die Zahl der Federn nach Beauforts Skale die Stärke an; in anderen Karten geht die Windrichtung nach der Pfeilspitze hin; in den Karten der deutschen Seewarte ist dieselbe durch einen Kreis ersetzt, der die Bewölkung anzeigt, indem er ganz weiß, zu $^1/_4$, $^2/_4$ oder $^3/_4$ oder ganz schwarz ausgefüllt ist. Die Karten der Times von R. Scott enthalten auch noch die Temp. der Stationen in Zahlen; die deutsche See-

warte gibt die Temp., Niederschlag und Seegang in einer zweiten Karte an. Wie aus einer solchen Karte die Prognose gezogen wird, kann mit unserem Theilkärtchen erörtert werden. In den letzten Mon. des Jahres 1880 herrschte in ganz Westeuropa, da tiefe und flache Depressionen fortwährend einander jagten, eine feuchtmilde, aber auch häufig regnerisch-stürmische Witterung; allgemein war man daher am 22. Dec. erfreut, einen heiteren Himmel zu schauen und aus der eingetretenen Kühle bei hohem Barometerstande schließen zu dürfen, daß hellfrisches Winterwetter bevorstehe. Die Wetterwarte aber sagte: „Westlich von Irland ist eine neue Depression eingetreten, also Fortdauer des feuchtmilden Wetters zu erwarten.“ Das Min. tritt in der Fig. aus den concentrischen Isobaren und ihren Zahlen des Luftdruckes hervor, der bei uns sich bis 770 erhob. Hieraus ist zunächst ersichtlich, warum wir trotz des hohen Barometerstandes doch Südwind hatten, weil der Luftdruck nach Norden abnahm, allerdings nur leichten, weil die Abnahme gering war; dieser S führte uns durch die Ablenkung mehr östl. Luft zu, weßhalb an diesem Tage der Himmel heiter, die Temp. kühl war. Da diese Depressionen gewöhnlich nach Osten wandern, so war für die folgenden Tage Drehung des S über SW nach W und feuchtmildes Wetter zu erwarten; am 24. lag das Min. auf der Nordsee, am 25. auf der Ostsee. Das Wetter war nur als feuchtmild und nicht regnerisch-stürmisch zu prognosticiren, weil die Abnahme des Luftdruckes, also auch die Gradienten und die Windstärke gering waren; das feuchtmilde Wetter wurde erst Anfangs 1881 durch eine den ganzen Januar anhaltende frosterzeugende Anticyklone verdrängt.

Fig. 410.



ad 3. Die Eigenschaften der Cyklonen, die in ihnen waltenden Windrichtungen, Niederschläge und Temp. wurden in 608. betrachtet. Wenn man hiernach weiß, welche Straße die Cyklone einschlagen wird, so lassen sich auch alle Orte angeben, die in den nächsten Tagen von der Cyklone heimgesucht werden; wird dabei berücksichtigt, ob die Cyklone nördlich, wie es bei uns fast immer der Fall ist, von einem Orte fortschreitet, wobei ihr südlicher Theil durch den Ort geht, oder daß sie südlich vorbeizieht, wie es für Skandinavien häufig ist, oder daß endlich das Centrum selbst über die Gegend hinwandert, wie es für Großbrittanien, Nordsee und Ostsee oft geschieht, so werden die bekannten Erscheinungen der Cyklone für den Ort eintreffen; kennt man die Geschw. der Cyklone, so läßt sich auch angeben, wann dieselben für den Ort stattfinden werden. Leider treffen diese Voraussetzungen nur für die Sturmcyklonen annähernd ein, worauf die Sturmwarnungen beruhen, die von der Seewarte Morgens und Abends den Hafenämtern mitgetheilt und dem Publicum und den Seefahrern durch Sturmsignale übermittelt werden; an hochgelegenen Stellen werden dreieckige und quadratische Körbe mit Segeltuch bedeckt in die Höhe gezogen; Nachts werden die Eckpunkte durch Laternen markirt; 1 Dreieck Spitze nach oben bedeutet mäßigen NW-Sturm, Spitze nach unten mäßigen SW, 1 D. Sp. nach oben und 1 V. bedeutet starken NW, Sp. nach unten starken SW; die seltener vorkommenden Stürme aus NO und SO werden durch 2 D. und 1 V. signalisirt. Dagegen die Prognose des gewöhnlichen Wetters gewährt selbst für den nächsten Tag noch nicht vollständige Sicherheit und ist für fernere Zeit ganz unsicher; man unterscheidet die locale Prognose und die auswärtige Prognose; letztere gab z. B. die deutsche Seewarte in Hamburg für verschiedene Gebiete Deutschlands. Die auswärtige Prognose hat nur 70—80% Treffer, weil die Hauptelemente des Wetters, Temperatur und Regen, von localen Umständen stark beeinflußt werden, deren Berücksichtigung der localen Prognose 80—90% Treffer verschaffen. Bei beiden Prognosen sind die allgemeineren Elemente, Luftdruck, Winde und Bewölkung durch Cyklonen und Anticyklonen bedingt. Die Herrschaft der Anticyklone bringt beständiges helles Wetter, klaren Himmel; denn in derselben ist ein absteigender Luftstrom, der die wasserdampfarme Luft der Höhen in die Tiefe bringt, wo sie durch den zunehmenden Luftdruck verdichtet, etwas erwärmt und dadurch noch trockener wird, so daß das ganze Gebiet der Anticyklone trockene Luft enthält. In den klaren Sommertagen kann daher die Einstrahlung der Sonne un-

gehindert wirken; in den klaren Sommernächten findet wegen der ungehinderten Ausstrahlung allerdings eine Abkühlung statt; da die Ausstrahlung jedoch nur kurze Zeit wirkt, während die fast senkrechte Einstrahlung lange dauert, so bewirkt eine lang herrschende Anticyklone im Sommer große Hitze. So herrschte 1715 eine halbjährige Anticyklone, indem es von März bis Oct. nicht regnete, die Flüsse trockneten aus, und die Temp. stieg bis 38° R; im Jahr 1815 soll sie sogar bis 40° R gestiegen sein (in den letzten 50 Jahren war die höchste beobachtete Temp. am Rhein und in Berlin 28° R). Im Winter dagegen ist die Einstrahlung wegen der kurzen Tage und der schiefen Richtung der Strahlen unbedeutend, während die Ausstrahlung in den langen klaren Nächten ungemein stark ist; die Anticyklone erzeugt also im Winter große Kälte; so beobachtete man im Bereich des ständigen sibirischen Wintermax. am 30. Dec. 1871 die größte Kälte von — 63,2°, und haben Januar und Februar an diesem Orte mittlere Temp. von — 46° und — 49°. Im Frühling und Herbst, wo Ein- und Ausstrahlung fast gleich sind, findet die Winterwirkung statt, wenn die Temp. über der normalen liegt, weil dann die Ausstrahlung überwiegend wird, die Sommerwirkung dagegen, wenn die Temp. unter der normalen liegt. Es gibt noch kein Mittel, die Dauer der Anticyklone im Voraus zu bestimmen, ihr Ende wird durch das Auftreten der Cirruswolken noch früher vorausgesagt, als durch das Fallen des Barometers. Die Anticyklone wird nämlich verdrängt durch eine Cyklone; in dieser herrscht ein aufsteigender Strom feuchter Luft, die oben nach allen Richtungen abfließt und zwar vorwiegend nach einer nahen Anticyklone hin, weil in deren Höhe ein Strömen nach dem absteigenden Centrum vorhanden ist. In dieser kühlen Höhe von 1—2 M. wird über der Anticyklone der Wasserdampf zu Eisnadeln condensirt, welche als Cirruswolken den blauen Himmel mit einem weißen Schleier überziehen, oder, wenn die Grenzstelle im Gesichtskreise liegt, von dieser aus in strahlenartigen Streifen am blauen Himmel hinziehen, welche die Matrosen **Windbäume** nennen und als Sturmvorboten fürchten; der Ausgangspunkt zeigt die Gegend an, aus welcher die Cyklone kommt und liegt für uns meist nordwestlich, weil die Cirri am vorderen Theil der Cyklone rechts liegen. Durch das Vordringen der leichten Cyclonenluft wird in der Anticyklone das Luftgewicht allmälig vermindert, wodurch das Fallen des Barometers eintritt.

Würden die Cyklonen immer dieselbe westöstliche Zugstraße Irland-Rußland mit gleicher Geschw. und gleicher Tiefe entlang gehen und wäre eine Regel bekannt, nach welcher die Verflachung und die Abnahme der Geschw. stattfindet, so könnte man für ganz Europa das Wetter wohl für eine Woche vorausbestimmen, z. B. für unsere Gegend fallendes Barometer, steigendes Thermometer bei allmälig zunehmendem Regen und SO-Wind, der durch S in SW übergeht; beim dann erfolgenden Drehen nach W und NW steigendes Barometer und fallendes Therm. mit zunehmender Aufklärung. Aber die europäischen Minima befolgen nicht weniger als 5 Zugstraßen und diese nicht immer genau, außerdem aber noch zahlreiche erratische Bahnen, und diese letzteren sind im Sommer, wo die Prognose am meisten Vortheil bringen könnte, häufiger als die regulären Zugstraßen; außerdem wird ein Min. manchmal stationär oder retrograd oder verflacht sich plötzlich bis zum Verschwinden, und die Geschw. des Fortziehens, die Art der Verflachung ist öfters unregelmäßig; abgezweigte Theilminima oder Zungen niedrigen Luftdrucks stören den gewöhnlichen Verlauf. Hierdurch wird die Prognose einstweilen für längere Zeit unmöglich und für die nächsten 2 Tage nicht ganz sicher. Indessen sind 70 bis 90% Treffer für die nächsten 2 Tage schon ein annehmbares Resultat; dasselbe wird zunächst dadurch ermöglicht, daß die Zugstraßen durch den Stand der Cirruswolken, durch die rechtsseitige Lage der höheren Gradienten und Temp., durch die gleiche Richtung der großen Ellipsenachse mit der Zugstraße u. s. w. näher bestimmt werden, als es bisher möglich war. Erhält daher ein Interessent am beginnenden Nachmittage die Depeschen der Seewarte, zeichnet die Barometerstände in eine bereit liegende gedruckte Wetterstationenkarte von Europa und zieht sodann die Isobaren, so kann die Zugstraße des Min. mit einiger Wahrscheinlichkeit angegeben werden; ist ein Max. vorhanden, so ist aus seiner Entf. und Höhe zu erschließen, ob sein Einfluß den des Min. überwiegt, wobei die augenblicklich herrschende Windrichtung zu Rathe gezogen werden muß. Ist der Einfluß des Min. überwiegend, so erfolgt der angegebene Wetterverlauf, wenn das Min. über den Ort selbst geht oder die Zugstraßen II, III oder IV einschlägt; Zugstraße I bringt für Norddeutschland anhaltenden schwachen Landregen, für Süddeutschland nicht, V bringt im Frühling Nachtfrost, im Sommer Hagelwetter und Gewitter für den Westen, und wenn sie durch Italien nach Osten biegt, auch für den Osten, ebenso wie die erratischen und Theilminima. Bei der localen Prognose können die klimatischen Verhältnisse und die eigenthümlichen Einflüsse der Gegend mit in Betracht gezogen werden, es ist möglich, den Wetterverlauf noch zu berücksichtigen, der seit dem Zeitpunkte, für den die Karte gilt, eingetreten ist, sowie den augenblicklichen Zustand der Atmosphäre, wodurch die locale Prognose ihre größere Trefferzahl gewinnt.

Register.

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.



